



YANO SANTANA DE SOUZA

**PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DO LICOR NEGRO:  
GERAÇÃO DE ENERGIA**

YANO SANTANA DE SOUZA

**PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DO LICOR NEGRO:  
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Instituição Pitágoras como requisito parcial para  
a obtenção do título de graduado Engenharia  
Química.

Orientador: Josiane Leticia Hernandez

YANO SANTANA DE SOUZA

**PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DO LICOR NEGRO:  
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Instituição Pitágoras como requisito parcial para  
a obtenção do título de graduado Engenharia  
Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

---

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Teixeira de Freitas, junho de 2022

SOUZA, Yano Santana. **Processo De Recuperação Do Licor Negro: Geração De Energia**. 2022. 32fls. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química - Faculdade Pitágoras, Teixeira de Freitas, 2022.

## RESUMO

No segmento de papel e celulose, o processo de recuperação e geração de energia possui uma função fundamental para o setor. As fábricas de celulose estão se desenvolvendo cada vez mais e, conseqüentemente, as caldeiras de biomassa também. Além de evoluírem ainda mais a forma como produzem a bioeletricidade com uso de tecnologias mais eficientes a recuperação *Kraft* consiste em um processo de restauração dos materiais inorgânicos como hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio utilizados na etapa de cozimento do composto presente no licor negro. Sendo assim, questiona-se: como o licor negro pode ser utilizado para produção de energia e a extração da lignina de modo a reduzir os impactos ambientais causados pelas fabricas de papel e celulose? O objetivo geral deste trabalho foi descrever o processo Kraft ressaltando a necessidade do reaproveitamento dos resíduos gerados. O tipo de pesquisa realizado neste trabalho foi uma Revisão de Literatura, no qual foi realizada consulta a livros, dissertações e em artigos científicos selecionados através de busca nos seguintes bases de dados: Scielo e CAPES. Dessa forma conclui-se que o processo de recuperação de licor negro se torna algo vantajoso para as fabricas de papel e celulose, de modo que além de recuperar os químicos utilizados no cozimento, a geração de vapor da sua queima produz energia que supre as necessidades da própria empresa. Visto a relevância deste tema, nota-se a necessidade de realizar mais pesquisas e desenvolvimento sobre o uso do licor negro para outras finalidades além da geração de energia.

**Palavras-chave:** Licor Negro; Energia, Papel e Celulose; Caldeira de Recuperação.

SOUZA, Yano Santana. **Black Liquor Recovery Process: Power Generation.** 2022. 32fls. Course completion work (Graduate in Chemical Engineering - Faculdade Pitágoras, Teixeira de Freitas, 2022).

### **ABSTRACT**

In the pulp and paper segment, the energy recovery and generation process plays a fundamental role for the sector. The pulp mills are developing more and more and, consequently, the biomass boilers as well. In addition to further evolving the way they produce bioelectricity using more efficient technologies Kraft recovery consists of a process of restoring inorganic materials such as sodium hydroxide and sodium sulfide used in the cooking stage of the compound present in black liquor. Therefore, the question is: how can black liquor be used for energy production and lignin extraction in order to reduce the environmental impacts caused by pulp and paper factories? The general objective of this work was to describe the Kraft process, highlighting the need to reuse the generated waste. The type of research carried out in this work was a Literature Review, in which books, dissertations and selected scientific articles were consulted through a search in the following databases: Scielo and CAPES. In this way, it is concluded that the black liquor recovery process becomes something advantageous for pulp and paper factories, so that in addition to recovering the chemicals used in cooking, the generation of steam from its burning produces energy that meets the needs of the company itself. Given the relevance of this topic, there is a need to carry out more research and development on the use of black liquor for purposes other than energy generation.

**Keywords:** Black Liqueur; Energy, Paper and Cellulose; Recovery boiler.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Processo de <i>Kraft</i> .....	13
<b>Figura 2</b> – Composição do Licor Negro .....	14
<b>Figura 3</b> – Esquema de Evaporador Múltiplo (a) Paralelo (b) contracorrente .....	17
<b>Figura 4</b> – Reatores de Caustificação .....	18
<b>Figura 5</b> – Caldeira de Recuperação .....	19
<b>Figura 6</b> – Tanque de Dissolução.....	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Teores de Celulose.....	11
---	----

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 – Estágios de Combustão do Licor Negro.....</b>	<b>21</b>
---	-----------

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: PROCESSO KRAFT .....</b>	<b>11</b>
2.1 O PROCESSO KRAFT .....	12
2.2 O LICOR NEGRO .....	14
2.2.1 Características do Licor Negro .....	15
2.2.2 Teor de sólidos secos .....	15
2.2.3 Viscosidade.....	15
<b>3. LINHA DE RECUPERAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
3.1 EVAPORAÇÃO .....	16
3.2 CAUSTIFICAÇÃO .....	18
3.2 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO .....	19
<b>4. PROCESSOS DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
4.1 PRINCIPAIS PROCESSOS.....	23
4.1.1 Sistema de Combustão e gás .....	23
4.1.2 Sistema de Ar .....	23
4.1.3 Licor Negro .....	24
4.1.4 Vapor e Água .....	24
4.1.5 Óleo e gás.....	24
4.1.6 Licor Verde.....	25
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No segmento de papel e celulose, o processo de recuperação e geração de energia possui uma função fundamental para o setor. As fábricas de celulose estão se desenvolvendo cada vez mais e, conseqüentemente, as caldeiras de biomassa também. Além de evoluírem ainda mais a forma como produzem a bioeletricidade com uso de tecnologias mais eficientes.

Com o alto custo de energia ligado a possibilidade de venda do que é excedente para outros mercados, a indústria de papel e celulose possui um motivador para desenvolvimento de novas tecnologias e para investimento na área da eficiência energética. Sendo a sua maior parte de energia gerada através do vapor da queima do licor negro nas caldeiras.

A maior parte da energia que é gerada na indústria de papel e celulose é proveniente do vapor que é produzido pela queima do licor negro em caldeiras de recuperação. A recuperação *Kraft* consiste em um processo de restauração dos materiais inorgânicos como hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio utilizados na etapa de cozimento do composto presente no licor negro. Sendo assim, questiona-se: como o licor negro pode ser utilizado para produção de energia e a extração da lignina de modo a reduzir os impactos ambientais causados pelas fabricas de papel e celulose?

O objetivo geral deste trabalho foi descrever o processo Kraft ressaltando a necessidade do reaproveitamento dos resíduos gerados. Os objetivos específicos foram: descrever o processo Kraft e a produção de licor negro; discorrer sobre as caldeiras de recuperação química e a extração da lignina do licor negro; e discutir o processo de utilização do licor negro como fonte geradora de energia para indústria de papel e celulose e suas vantagens.

Essa pesquisa se fez relevante devido haver uma importância para o grupo acadêmico em saber como é feita a geração de energia utilizando o licor negro que é gerado no processo *kraft*, e como além dele a lignina extraída deste subproduto pode contribuir ainda mais para redução dos impactos ambientais que as indústrias de papel e celulose podem causar.

O tipo de pesquisa realizado neste trabalho foi uma Revisão de Literatura, no qual foi realizada consulta a livros, dissertações e em artigos científicos selecionados através de busca nos seguintes bases de dados: Scielo e CAPES. Os livros e artigos

selecionados foram na linguagem portuguesa e estrangeira tendo como período de estudo de 2001 a 2021. As palavras-chave utilizadas na busca foram: licor negro, energia, papel e celulose e caldeira de recuperação.

## 2. INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: PROCESSO KRAFT

O Brasil é considerado o quarto maior produtor de celulose do mundo, com uma produção de aproximadamente 18,77 milhões de toneladas, em se tratando de fibra curta o país é o primeiro no ranking, em que 67% desta produção é exportada para fora do país (FOELKEL, 2007).

O processo de obtenção da celulose pode ser feito, teoricamente, utilizando qualquer material lignocelulósicos, sendo que esse material é definido como qualquer tipo de material fibroso, que constitui matrizes mais complexas de celulose, pectina, hemicelulose, dentre outras que estão presentes em uma estrutura de lignina (CARREIRO, 2009).

Carreiro (2009) explica que as fibras que possuem maior valor econômico são utilizadas largamente na indústria de papel e celulose são as da madeira, sendo elas folhosas ou resinosas, tendo seus teores de celuloses descritos no Tabela 1, de acordo com a pesquisa do autor.

**Tabela 1 – Teores de Celulose**

<b>MATERIAL</b>	<b>TEOR DE CELULOSE</b>
Folhosa	40% - 50%
Resinosa	45% - 50%

**Fonte:** Carreiro (2009)

Para que a fibra celulósica seja extraída, a indústria de papel e celulose realiza tratamentos na madeira para que haja a remoção, degradação e solubilização da lignina, assim obtendo a polpa ou pasta celulósica. Para obter tão material é necessário utilizar tratamentos de caráter físico, químico, biológico e mecânico a depender da espécie da madeira e para qual fim ela será utilizada (GUERATO; JUNIOR, 2012).

Geralmente se utilizam mais os processos químicos na indústria de papel e celulose, baseando no cozimento de uma determinada espécie química do material lignocelulósicos, sendo classificados conforme o pH, em que nesse tipo de indústria utiliza-se a polpação química alcalina (GUERATO; JUNIOR, 2012).

Quando se fala sobre polpação alcalina segundo Bittencourt (2004), se inclui todas as técnicas para produção da polpa celulósica, em que os vegetais que possuem a fibra de celulose são combinados com soluções alcalinas aquosas. Os principais processos para se produzir esse material são o de soda e o processo kraft ou também conhecido como sulfato.

No processo soda, o reagente utilizado é o hidróxido de sódio, enquanto no kraft se utiliza o sulfato, além do hidróxido e o sulfeto de sódio. Ambos os processos são similares, mas a maioria das empresas utilizam o processo kraft ou sulfato. A vantagem do uso do processo kraft está na sua alta capacidade de recuperação dos insumos químicos que são utilizados no decorrer do processo produtivo (BITTENCOURT, 2004).

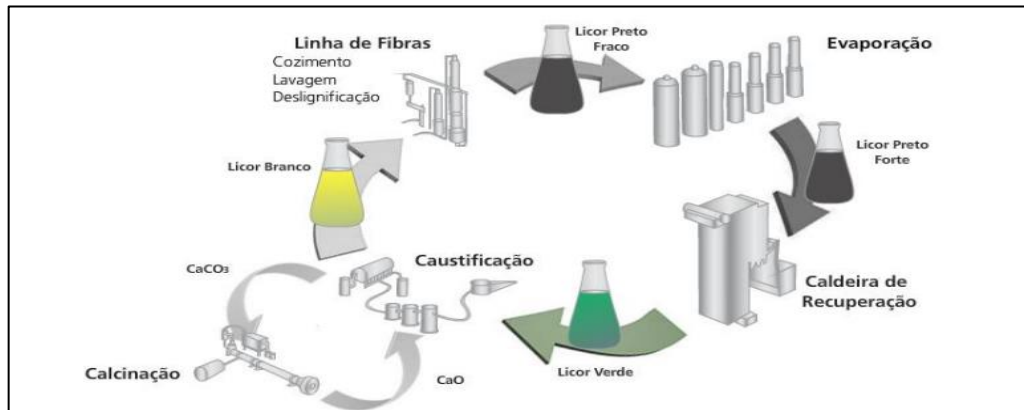
Castro (2009), explica que nas indústrias brasileiras o processo mais utilizado para produção de celulose é o processo *Kraft*. Esse processo tem como base a utilização de soda cáustica e sulfeto de sódio que tem por objetivo dissolver a lignina da madeira nos digestores sob alta pressão e temperatura

## 2.1 O PROCESSO KRAFT

O processo de produção de celulose *Kraft*, foi descoberto pelo químico alemão Dahl no ano de 1879. Nesse processo de polpação *Kraft*, a madeira passa por um processo de cozimento no digestor com o uso de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) com um pH alcalino. Processo esse que irá dissolver a lignina que é o agente que liga as fibras da madeira. O principal intuito desse método é preservar a resistência da fibra e assim obter a polpa celulósica com rendimento de aproximadamente 60% (CASTRO, 2009).

As principais vantagens ao se utilizar o processo *Kraft* são a sua eficiência energética, menor tempo de cozimento e a sua capacidade de recuperação dos produtos químicos utilizados durante a etapa de cozimento. Sendo as principais etapas para produção de celulose o preparo da madeira, seguidas do cozimento, depuração, branqueamento e a recuperação do licor como mostrados na Figura 1 (BERNI, 2017).

**Figura 1 – Processo de *Kraft***



Fonte: Silva (2016)

Segundo Paula (2010), as toras são transportadas para o pátio de madeira das fábricas, ali passam pelo processo de descascamento (em alguns casos feito no campo) e corte em pequenos pedaços que recebem o nome de cavacos, seguindo assim para a etapa de cozimento.

Os cavacos alimentam o digestor juntamente com o licor de cozimento composto por hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. As adições das substâncias químicas como o sulfeto são feitas para que assim o processo de dissociação da lignina das fibras de celulose seja melhorado de modo a acelerar o cozimento da madeira e aumentar a resistência da polpa produzida (PAULA, 2010).

Jorge (2018) explica que após o processo de cozimento a celulose passa pela etapa de branqueamento até que atinja o grau desejado, seguindo para a etapa em que é armazenada próxima a máquina de secagem de celulose. O autor diz ainda que se a indústria tiver a produção de papel integrada, ou seja, se ela possuir uma máquina de papel e celulose produzida pode ser utilizada na produção do papel.

Após todas essas etapas, o líquido é então separado pelo processo de lavagem recebe o nome de licor negro. Esse licor é um material orgânico dissolvido com outros compostos inorgânicos e substâncias químicas que foram utilizadas para o cozimento. O licor negro ainda passa por processos de evaporação para que sua concentração de sólidos aumente para que assim seja transportado para caldeira de recuperação e então queimado para gerar vapor e eletricidade (JORGE, 2018).

## 2.2 O LICOR NEGRO

O licor negro é um líquido que deixa o digestor junto com os cavacos no processo kraft, ele possui uma coloração escura, por isso recebe esse nome. É constituído de forma complexa, e depende da composição do licor branco que foi utilizado durante a etapa de cozimento e o tipo de madeira. Coexistindo materiais inorgânicos e orgânicos (resíduos gerados durante o processo) (CARDOSO, 2009).

O licor negro possui uma temperatura que fica em torno de 70 a 95°C, a depender da temperatura da água e de quantos estágios de lavagem que ele passou. Nos digestores contínuos, o licor negro é enviado para evaporadores com a concentração de 18% de sólidos totais e geralmente com temperatura em torno de 85-95°C, tendo seu pH em torno de 11,5 em média. A Figura 2 mostra a composição de um licor negro.

**Figura 2 – Composição do Licor Negro**

Composto	%m/m de sólidos secos
Lignina	29 - 40
Hemicelulose e açúcares	0,1 – 1,5
Ácidos orgânicos	1 - 14
Alcoóis	< 1
Compostos orgânicos desconhecidos	10 - 30
Compostos inorgânicos desconhecidos	< 2
Sais Inorgânicos	18 - 30
Orgânicos combinados com Na	8 - 10

**Fonte:** Silva (2016)

O Cozimento nas condições normais médias, fazem o uso dos digestores que possuem o aquecimento feito por vapor e a depender do número de estágios utilizados, eles fornecem licores com concentrações em torno de 15 a 18%. No caso em digestores com aquecimento feito de forma indireta e a lavagem da pasta passando por 6 estágios, a concentração de licor negro pode chegar a 22% de teor de sólidos totais (ANDREUCETTI, 2010).

### 2.2.1 Características do Licor Negro

A composição do licor negro vai depender da madeira utilizada e da relação álcali/madeira junto a taxa de cozimento e do teor de lignina residual presente na polpa. As suas propriedades permitem a sua reutilização em forma de energia em toda fábrica. Além disso, algumas propriedades físicas afetam diretamente a evaporação, como teor de sólidos secos, viscosidade do líquido, elevação do ponto de ebulição, poder calorífico e condutividade térmica (ANDREUCETTI, 2010).

### 2.2.2 Teor de sólidos secos

O teor de sólidos secos é a razão entre as massas de licor negro antes e depois da coleta de uma amostra que é submetida ao processo de secagem em estufa a 105°C por um tempo. A massa é influenciada pela concentração de compostos inorgânicos. Nela acontece a evaporação da água, dos compostos orgânicos voláteis. Nesse processo, o sulfeto de sódio sofre oxidação e se transforma em  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (tiosulfato de sódio), o que aumenta a quantidade de sólidos secos no licor negro (SILVA, 2001).

### 2.2.3 Viscosidade

A viscosidade do licor negro está ligada ao tipo de madeira e as condições como a de cozimento, concentração dos seus sólidos, de seu teor álcali residual e a sua temperatura. A viscosidade aumenta de acordo com a concentração de sólidos (aumenta) e reduz com o aumento da temperatura, sendo no processo kraft a temperatura da viscosidade 120°C a 125°C (PAULA, 2017).

### 3. LINHA DE RECUPERAÇÃO

As fabricas de papel e celulose são dependentes de diversos processos que utilizam um ciclo produtivo eficiente. Essas indústrias necessitam de grandes quantidades de energia e vapor, com isso são buscadas cada vez mais técnicas e formas de inovar o ciclo produtivo (VAKKILAINEN, 2005).

Uma das melhores formas de reaproveitamento foi o a utilização do licor negro como combustível. O licor negro é alcalino e nos anos de 1930 a 1940, costumava ser rejeitado, dessa forma durante esses anos também foram desenvolvidas formas para recuperação deste licor em grande escala (CAVARARO, 2015).

Passini (2017), explicam que a recuperação do processo *Kraft* é uma parte importante na fábrica economicamente e ambientalmente. Nesse aspecto as unidades de recuperação são responsáveis por utilizar o licor negro para funções como: Recuperação do licor branco, o que reduz diretamente o consumo de mais insumos na produção; produzir vapor para desse modo gerar energia através dos turbogeradores; diminuir os impactos ao meio ambiente que o licor negro pode causar caso seja despejado de forma incorreta.

E a linha de recuperação que torna viável o processo realizado nas fabricas de papel e celulose tanto economicamente quanto ambientalmente. Ao recuperar o licor negro, gerado pelo cozimento dos cavacos no licor branco, a indústria de papel e celulose consegue gerar energia através do vapor gerado na queima do licor negro nas caldeiras. Algumas etapas como evaporação, caldeira de recuperação, caustificação e calcinação fazem parte do processo de recuperação, além destes há também o processo de tratamento de água e efluente (FERREIRA, 2013).

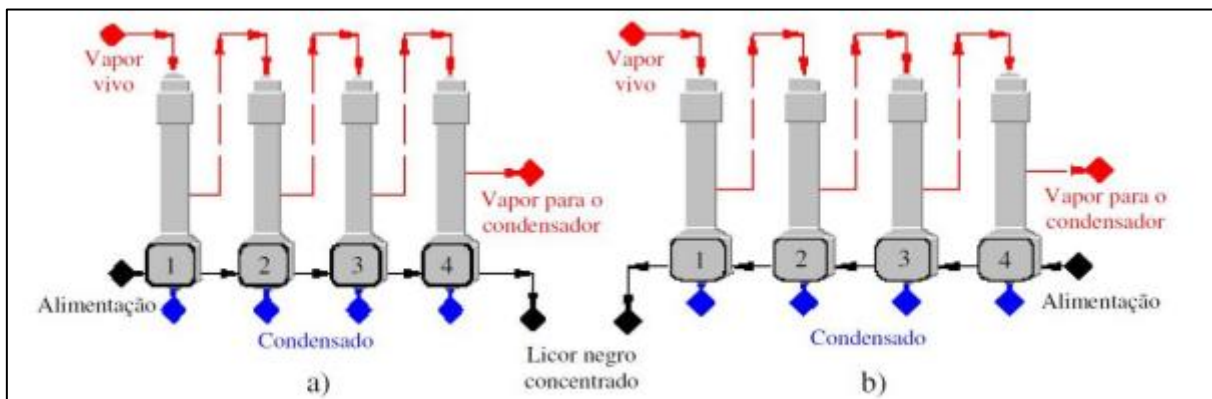
#### 3.1 EVAPORAÇÃO

Silva (2014), descreve a evaporação como uma remoção do solvente na forma de vapor, tendo como objetivo aumentar a concentração do soluto não volátil. Os vapores podem ser definidos como tanques, em que se encontram a solução que será concentrada através do contato com trocadores de calor que irão fornecer a energia que o processo necessita para a evaporação.

O sistema de evaporadores de múltiplos efeitos (Figura 3) é usado geralmente pela indústria devido a economia que o sistema pode gerar. O funcionamento dele

proven do uso de vapor da solução que é produzido no primeiro efeito no trocador de calor e com o efeito seguinte, seguindo de forma sequencial, implicando na redução de custos ligados a geração do vapor para concentrar a solução (FERREIRA, 2013).

**Figura 3 – Esquema de Evaporador Múltiplo (a) Paralelo (b) contracorrente**



Fonte: Campos (2009).

Após ocorrer a transferência de energia que está contida no vapor da solução concentrada, os evaporadores fazem a eliminação da água em estado líquido. Esta água é que está condensada, possui níveis de pureza que possibilitam o seu uso para lavagem da celulose e da lama de cal. Assim como mostrado na Figura 3, existem evaporadores que apresentam os dois arranjos podendo ser paralelos ou contracorrente, onde a escolha desse arranjo é feita de acordo com o projeto (CAMPOS, 2009).

Nas empresas de papel e celulose normalmente utilizam três tipos de evaporadores para concentrar esse licor preto conforme explicado pelos autores Ek *et al.* (2009):

- a) *Climb Film*: Evaporador formado por trocadores de calor com tubos verticais com comprimento de no máximo 10 metros. Concentram soluções com teor de até 50% de sólidos secos.
- b) Circulação forçada: Podem concentrar o licor negro de 50% até 80% de teor de sólidos secos. O equipamento utiliza uma bomba para circular a solução que deve ser concentrada, possui tubos que podem chegar a 7 metros de comprimento com diâmetros que variam até 0,05 metros.
- c) Evaporadores de fluxo descendente (*falling film*): Possui grande faixa de concentração de licor negro, é um dos mais utilizados, ele faz com que o

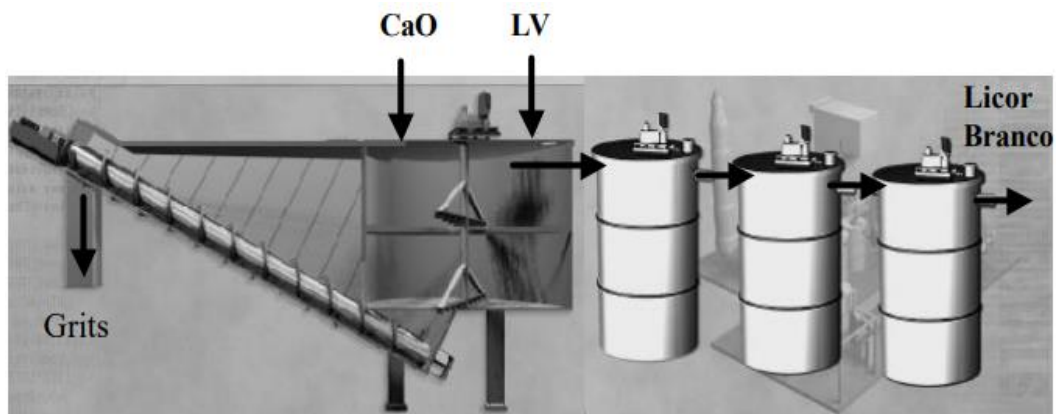
licor entre no topo do evaporador onde se localiza o trocador de calor. Neste há separação do solvente da solução na parte inferior do equipamento, e o vapor transforma-se em água condensada apenas fora da área onde ocorre a troca térmica.

### 3.2 CAUSTIFICAÇÃO

A caustificação tem por finalidade realizar a conversão de licor verde em licor de cozimento/ licor branco, que é utilizado no digestor. A conversão é alcançada através da adição de cal ao licor verde, e pelas reações de hidratação de cal e de caustificação, que produzem como subproduto o cálcio e o carbonato (GUT, 2016).

Quando o hidróxido de sódio é formado, inicia-se a reação de caustificação, em que o  $\text{Ca(OH)}_2$  vai reagir com o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  formando o hidróxido de sódio e o carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio que é gerado, também é conhecido como lama de cal, é filtrado, lavado e queimado em um forno para que assim seja convertido em cal e utilizado novamente no processo de caustificação (SHREVE; BRINK, 2008).

**Figura 4 – Reatores de Caustificação**



Fonte: Meneses (2005)

A reação que ocorre nos reatores de caustificação (hidratação) como apresentado na Figura 4 é uma reação exotérmica. Esta reação é reversível, e tem como intuito dirigir o equilíbrio para direita. Vale ressaltar que a água e o carbonato são obtidos do licor verde. O carbonato que é formado durante esse processo se precipita, e quando a lama é dividida do líquido restante, ela é clarificada e então

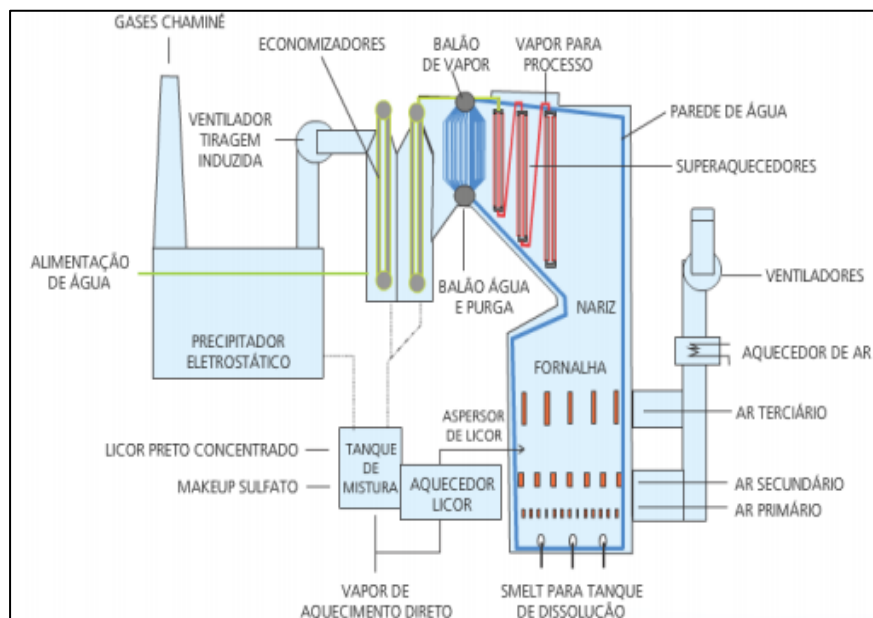
recebe o nome de licor branco, que volta para o digestor novamente para o cozimento dos cavacos (SHREVE; BRINK, 2008).

### 3.2 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

O licor preto gerado a partir da produção de papel e celulose, após a lavagem da polpa celulósica possui uma composição de 15 a 20% de sólidos e o restante é água. Para que esse licor possa ser utilizado pelas caldeiras como uma forma de combustível, é necessário que o seu teor de sólidos secos esteja em torno de 65 a 85%, para tal feito é necessário o uso de evaporadores (PASSINI, 2017).

As caldeiras utilizadas nas indústrias de papel e celulose queimam o licor negro e recuperam a soda, produzindo vapor e gerando energia. Estas empresas utilizam elevadas quantidades de energia, em forma de eletricidade e vapor, sendo que a crescente demanda por energia e os custos assim como danos provocados ao meio ambiente, fizeram com que esse o uso dessas máquinas fosse essencial para explorar a quantidade de calor que o licor negro pode produzir (CBC, 2016).

**Figura 5 – Caldeira de Recuperação**



**Fonte:** Silva (2016)

As caldeiras de recuperação (Figura 5) usam o licor negro como fonte de combustível para gerar energia. A composição deste composto possui os resíduos orgânicos de madeira dissolvidos junto com produtos químicos. Quando é feita a sua

combustão, o licor produz grande quantidade de calor o que faz uma enorme produção de vapor em alta pressão que é transferido para as turbinas a vapor elétrico, chamadas de turbogeradores (VAKKILAINEN, 2011).

Foelkel (2007), diz que a caldeira de recuperação funciona como uma caldeira de vapor e um reator químico. Nela uma parte grande dos produtos químicos do digestor são recuperadas, e o vapor gerado nesse processo é utilizado na geração de energia das fábricas.

Para que tenha a conversão de sulfato de sódio em sulfeto de sódio algumas condições são necessárias, como o licor deve estar no fundo da fornalha, a temperatura do forno e a atmosfera reduzida dentro e acima da caldeira. Porém, isso não é suficiente para converter os produtos químicos. É importante manter uma boa condição do fluxo de gás e um controle das cinzas geradas (JORGE, 2018).

#### 4. PROCESSOS DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

O processo das caldeiras de recuperação é dividido em vários processos menores. Segundo Foelkel (2007): combustão da matéria orgânica para geração de vapor; redução de compostos inorgânicos como enxofre; produção de composto inorgânico fundido por carbonato de sódio e dissolução em licor branco para produção de licor verde; processo de recuperação das cinzas inorgânicas após a combustão para recuperação dos químicos; produção de fumaça de sódio para captura dos resíduos gerados pela combustão de enxofre a Quadro 2 mostra de forma resumida os estágios de combustão do licor negro.

**Quadro 1 – Estágios de Combustão do Licor Negro**

<b>Estágio</b>	<b>Descrição característica</b>	<b>Tempo dentro da fornalha de uma gota de 2mm</b>
Secagem	Evaporação da água Diâmetro constante	0,1 a 0,2s
Devolatilização	Ignição, apresentação da chama Dilatação da gota Liberação de voláteis	0,2 a 0,3s
Carbonização	Desaparecimento da chama Redução do diâmetro Redução das reações	0,5 a 1s
<i>Smelt</i>	Diâmetro constante/ aumento Roxidação	Longo Período

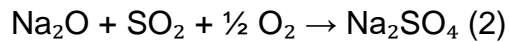
**Fonte:** Jorge (2018)

O calor que é gerado durante a queima do licor negro na caldeira gera o vapor como já explicado, vapor esse responsável por fazer as turbinas girarem. A eficiência de conversão do licor negro em vapor é inferior à de combustíveis fósseis devido ao calor que é empregado na evaporação e o que é carregado junto ao *smelt* que vai para o tanque de dissolução (FOELKEL, 2007).

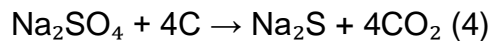
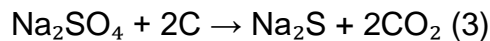
Em uma caldeira é gerado aproximadamente 2,5kg a 3,8kg de vapor a cada quilograma de licor negro sólido. A depender do tipo da turbina e da qualidade do vapor produzido a produção pode ultrapassar os 25 MW de eletricidade com uma queima de cerca de 1500 toneladas por dia de licor negro na caldeira (JORGE, 2018).

Silva (2016), explica que uma outra função importante das caldeiras de recuperação nas indústrias de papel e celulose é a produção de carbonato de sódio e o sulfeto de sódio, sendo produtos fundamentais na caustificação e produção de licor

branco. O autor diz ainda que as reações utilizadas para a queima de licor podem ser descritas como:



No inferior da caldeira tem-se as reações como:



As cinzas geradas da queima e do pó do precipitador eletroestático podem ser misturadas ao licor negro no tanque, antes de ocorrer a aspersão na fornalha (etapa dos evaporadores). O *smelt* então é resfriado com água desmineralizada, após o composto atingir temperaturas em torno de 800 a 950°C (FOELKEL, 2007).

**Figura 6 – Tanque de Dissolução**



Fonte: Silva (2016, p.23)

O *smelt* então é diluído em um tanque com licor branco fraco e forma assim o licor verde bruto que segue para a caustificação. A Figura 6 apresenta a imagem de uma fornalha, que possui entradas de ar e bicas de *smelt*, além disso a figura também mostra exemplos de tanque dissolvedor (VAKKILAINEN, 2011).

## 4.1 PRINCIPAIS PROCESSOS

Os processos mais importantes que envolvem a caldeira de recuperação química, segundo Silva (2016) são: sistemas de gás de combustão, de ar, de vapor e água, licor negro, licor verde, sistema de óleo e gás natural.

### 4.1.1 Sistema de Combustão e gás

O sistema de gases de combustão utilizado, transporta o material que é queimado na fornalha até a atmosfera de forma segura. Esses gases passam através de fornalhas pelas superfícies dos trocadores de calor. Os gases gerados passam através dos dutos e ventiladores até chegarem os precipitadores eletroestáticos (VAKKILAINEN, 2011).

Passini (2017), explica que a vazão que o gás possui naturalmente não é suficiente para que ele saia por completo, sendo necessário o uso de ventiladores. A vazão também é controlada através da fornalha e a pressão deve ser mantida em nível baixos, e outros complementos como precipitador eletroestático e o de redução de emissões são colocados para que assim seja reduzida a poluição.

### 4.1.2 Sistema de Ar

O licor negro como já dito é composto por materiais inorgânicos e orgânicos que reagem dentro da fornalha durante o processo de combustão. Quanto mais licor negro presente no tanque, maior é a quantidade de ar necessária. Os requisitos para que haja um sistema de ar na caldeira são a distribuição efetiva e uma mistura máxima de ar com gases de combustão (SILVA, 2016).

O ar é injetado normalmente através de elevações horizontais, que garantem a combustão completa e minimiza as emissões. O sistema de ar de caldeiras de recuperação conte dutos de entrada de ar com silenciadores, sopradores de ar, aquecedores, venturi para que seja calculado o fluxo de ar e os dutos de ar e de distribuição (VAKKILAINEN, 2005).

#### 4.1.3 Licor Negro

O licor negro é bombeado do tanque e passa por uma tubulação que faz uma injeção dele para a fornalha. A função da tubulação é assegurar que haja uma vazão igual para todos os injetores, existem casos em que as cinzas do precipitador são adicionadas ao licor que possua um teor de sólidos de mais ou menos 50% e então enviados para evaporação em sequência (VALMET, 2015).

O sistema de licor, faz medições de vazão, pressão e temperatura. Para que seja controlado esses parâmetros como a temperatura é utilizado um aquecedor de licor, que pode ou não está diretamente ligado ao vapor ou trocadores de calor. O sistema então deve ser feito com as recomendações necessárias e padronizado, para assim assegurar que não haja falhas ou riscos de explosão interna, externa ou incêndios (FERREIRA *et al.*, 2010).

#### 4.1.4 Vapor e Água

Mendonça (2016), diz que a circulação de água e vapor na caldeira iniciam com a água utilizada na alimentação a uma baixa pressão e finaliza como um vapor de alta pressão e temperatura. O sistema transporta, pré-aquece, pressuriza, vaporiza e superaquece a água até que forme o vapor com as características desejadas.

Para que a operação da caldeira seja confiável, a água de alimenta deve possuir um teor baixo de minerais e oxigênio. O sistema de alimentação de água é formado por um tanque de alimentação, um desaerador, bombas de água para alimentar a caldeira, válvulas de controle e sistemas de tubulações (VAKKILAINEN, 2005).

#### 4.1.5 Óleo e gás

O sistema de partida e parada, pode utilizar mais de um tipo de combustível. Cada queimador necessita de um monitoramento individual, em que arranjos com válvulas duplas asseguram o fechamento da linha de óleo. O óleo combustível pesado, para ser utilizado é necessário ter a sua viscosidade reduzida com aquecedores (MENDONÇA, 2016).

Quando utilizado o gás natural como combustível, um sistema de ventilação pode ser usado para impossibilitar vazamentos de gás para a fornalha. Ao se utilizar o gás natural é mais viável para operadores de caldeira apresentar um tempo com maior reposta durante o período de queima (VAKKILAINEN, 2005).

#### 4.1.6 Licor Verde

O licor verde como já dito durante o trabalho, é uma mistura de *smelt* com licor branco fraco feita no tanque dissolvedor. A mistura de matéria inorgânica fundida em água, gera calor, calor esse que faz com que o vapor gerado no tanque possa carregar partículas de licor. Para que seja evitada a produção de grandes volumes de gases, as cinzas são misturadas na mistura junto a um líquido alcalino (FERREIRA *et al.*, 2010).

O *smelt* que sai da caldeira é resfriado com o auxílio de água a 60°C que circula pelo sistema. Esse sistema requer um grande cuidado apesar de possuir uma baixa complexidade, para que sejam evitados aprisionamento de gases que são formados, o que pode gerar um aumento da pressão interna do tanque onde ocorrer a dissolução (VAKKILAINEN, 2005).

## 5. CONCLUSÃO

O processo *Kraft* utilizado nas fabricas de celulose, tem como uma das suas principais vantagens a sua eficiência energética e a sua capacidade de recuperar os químicos utilizados na etapa de cozimento. O licor negro produzido neste processo passa por um processo para aumentar o seu teor sólido, o que gera vapor.

As caldeiras são utilizadas para realizar a queima do licor negro, recuperando a soda e gerando vapor que produz energia. As indústrias de papel e celulose utilizam o licor elevadas quantidades de energia, geradas a partir do vapor e a crescente demanda e os impactos causados ao meio ambiente foram alguns dos fatores que impulsionaram a exploração do licor negro como fonte geradora de energia devido a sua quantidade de calor.

Dessa forma conclui-se que o processo de recuperação de licor negro se torna algo vantajoso para as fabricas de papel e celulose, de modo que além de recuperar os químicos utilizados no cozimento, a geração de vapor da sua queima produz energia que supre as necessidades da própria empresa. Visto a relevância deste tema, nota-se a necessidade de realizar mais pesquisas e desenvolvimento sobre o uso do licor negro para outras finalidades além da geração de energia.

## REFERÊNCIAS

ANDREUCCETTI, M. T. **Caracterização do Licor Negro de Eucalipto na Etapa de Evaporação e Correlação de Suas Propriedades**. 2010. 111 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UNICAMP, Campinas, 2010. Disponível em: <https://fdocumentos.tips/document/caracterizafo-do-licor-negro-de-eucalipto-na-etapa-soluo-utilizada-nessa.html>. Acesso em 11 mar. 2021

BERNI, M. Big/ANNEL e a geração de energia elétrica com fontes renováveis não convencionais. Coluna biomassa e energia renovável. **Revista O Papel**, p. 79. Disponível em: [http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1513221171\\_e3c2c3e10eb6a46f4ca053f2931dfc45\\_1465958895.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1513221171_e3c2c3e10eb6a46f4ca053f2931dfc45_1465958895.pdf). Acesso em 20 set. 2021

BITTENCOURT, E. Parâmetros de Otimização no Processo de Fabricação de Celulose e Papel. 2004. 73fls. Dissertação (Mestrado) – UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. (2004). Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/518/Disserta%3f%3fo%20Eduardo%20Bittencourt.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 15 mar. 2022

CAMPOS, S. G. S. **Modelagem Matemática e análise do Coeficiente Global de Transferência de Calor para o Processo de concentração do Licor Negro de Eucalipto em Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito**. 2009. 110fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial), Centro Universitário do Leste de Minas Gerais. Coronel Feliciano, 2009. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-125526/modelagem-matematica-e-analise-do-coeficiente-global-de-transferencia-de-calor-para-o-processo-de-concentracao-do-licor-negro-de-eucalipto-em-sistema-de-evaporadores-de-multiplo-efeito>. Acesso em 10 abr. 2022

CARDOSO, M. **Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills**. Fuel, vol. 88, issue 4, April 2009, p. 756-763. Disponível em: [https://www.academia.edu/7517128/Chemical\\_composition\\_and\\_physical\\_properties\\_of\\_black\\_liquors\\_and\\_their\\_effects\\_on\\_liquor\\_recovery\\_operation\\_in\\_Brazilian\\_pulp\\_mills](https://www.academia.edu/7517128/Chemical_composition_and_physical_properties_of_black_liquors_and_their_effects_on_liquor_recovery_operation_in_Brazilian_pulp_mills)

CARREIRO, M. R. M. **Análise Energética e Ambiental do Processamento de Licor Negro Gerado em Fábrica de Celulose e Papel**. 2009. 157fls. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica. (2009). Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1582/1/dissertacao\\_0035811.pdf](https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1582/1/dissertacao_0035811.pdf). Acesso em 11 mar. 2022

CASTRO, H. **Processos Químicos Industriais II: Papel e Celulose**. Universidade de São Paulo, Lorena, 2009. Disponível em: [http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/apostila6Detergente\\_s2009\[1\].pdf](http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/apostila6Detergente_s2009[1].pdf). Acesso em 20 set. 2021

CAVARARO, R. **Produção da Pecuária Municipal, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. v. 43, p. 49. Rio de Janeiro, 2015.

CBC Indústrias Pesadas. **Caldeira de Recuperação**. 2016. Disponível em: <https://www.cbcsa.com.br/pt-br/produtos-cbc/11-caldeiras/11-caldeira-de-recuperacao-quimica>. Acesso em 10 abr. 2022

EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G.. **Pulp and paper chemistry and technology, pulping chemistry and technology**. Germany, vol.2. 2009. Disponível em:

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5597689/mod\\_resource/content/1/Pulping%20Chemistry%20and%20Technology%20-Vol%202-%20De%20Gruyter.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5597689/mod_resource/content/1/Pulping%20Chemistry%20and%20Technology%20-Vol%202-%20De%20Gruyter.pdf) .Acesso em: 09 abr. 2016.

FERREIRA, D. J. O. **Modelagem de Caldeira de Recuperação Química Kraft**. 2013. 209fls. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26072013-122445/publico/Tese\\_FerreiraDJO\\_unprotected.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26072013-122445/publico/Tese_FerreiraDJO_unprotected.pdf) Acesso em: 12 abr. 2022

FERREIRA, D. J. O.; CARDOSO, M; PARK, S. W. **Gas flows analysis in a Kraft recovery boiler**. Fuel, v. 91, pp. 789-798, 2010.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais da Produção de Celulose Kraft de Eucalipto. **ABTCP** [online]. 2007. Disponível em: [https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT05\\_residuos.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT05_residuos.pdf). Acesso em 16 set. 2021

GUERATO, G.; JUNIOR RIBEIRO, J. R. **Otimização dos evaporadores tipo falling film de uma planta de evaporação do licor negro proveniente do processo de digestão da madeira – kraft, através da modificação do processo de lavagem visando o aumento da capacidade da unidade**. 2012. 167fls. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2012/MIQ12008.pdf>. Acesso em 9 mar. 2022.

GUT, J. A. W. **Como o Papel é Feito?**, 2016. Disponível em: <https://www.riaeduca.org/papel-parte-1>. Acesso em 10 abr. 2022

JORGE, I. **Estudo Sobre A Extração De Lignina Do Licor Negro, Seu Impacto No Processo De Recuperação E Geração De Energia E Seu Potencial Uso Em Novas Aplicações**. 2018. 60fls. (Monografia de Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Departamento acadêmico de Elétrica e Especialização em Energias Renováveis. Curitiba, 2018. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15452/1/CT\\_CEER\\_IV\\_2018\\_06.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15452/1/CT_CEER_IV_2018_06.pdf). Acesso em 15 set. 2021

MENDONÇA, J. **Coletor de pó - Precipitador eletrostática, lavadores úmido**. 2016. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/coletor-de-po-precipitador-eletrostatica-lavadores-umido/4716729/>. Acesso em: 05 abr. 2022.

MENESES, R. F. Modelagem do Sistema de Recuperação do Licor de Cozimento na Produção de Celulose. 2005. 23fls. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29289/000642615.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 15 abr. 2022

PASSINI, R. J. **Análise Energética De Um Sistema De Recuperação Química De Uma Fábrica De Papel De Celulose**. 2017. 167fls. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/677/dissertacao\\_passini\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/677/dissertacao_passini_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em 15 abr. 2022

PAULA, S. C. S. **Precipitation of lignin from Kraft black liquor**. 2010. 45fls. (Tese de Mestrado), Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57764/1/000144567.pdf>. Acesso em 2021

SHREVE, R. N.; BRINK Jr., A., J. **Indústria de processos químicos**. Editora Guanabara Koogan S.A, Rio de Janeiro - RJ, 2008.

SILVA, P. C. **Gestão da Energia na Indústria de Laticínios**. 2014. 198fls. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014. Disponível em: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1332290>. Acesso em 18 abr. 2022

SILVA, R. **Estudo de aumento de eficiência e produção de uma Caldeira de Recuperação Química**. 2016. 58fls. (Monografia de conclusão de curso), Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/155426/000883054.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 20 set. 2021

VAKKILAINEN, E. Modern Method to Determine Recovery Boiler Efficiency. **Revista O Papel**, v.72, n.12 p.58-65 [online], 2011. Disponível em: [http://www.revistaopapel.org.br/noticiaanexos/1359377111\\_7bc48fa8b7e072c7a6520423b6eeddf1\\_1138265000.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticiaanexos/1359377111_7bc48fa8b7e072c7a6520423b6eeddf1_1138265000.pdf). Acesso em 23 set. 2021

VAKKILAINEN, E. K. **Kraft recovery boilers - Principles and Practice**. suomen soodakattilayhdistys r.y. 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279871546\\_Kraft\\_recovery\\_boilers\\_-\\_Principles\\_and\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/279871546_Kraft_recovery_boilers_-_Principles_and_practice). Acesso em: 05 abr. 2022.

VALMET. **Ash treatment pays off in cleaner recovery boiler conditions**. Forward 2015. Disponível em: <https://www.valmet.com/pulp/chemical-recovery/recovery-boilers/Ash-treatment/> Acesso em: 16 abr. 2022.