

AVALIAÇÃO DO PONTO DE VISTA ECONÔMICO E AMBIENTAL PARA O PROCESSAMENTO DA CELULOSE

Lucas Munhoz dos Santos – lucasmunhozsan@gmail.com

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

Resumo:

Na indústria de papel e celulose, compreender as vantagens e desvantagens do processo ao qual vai ser utilizado torna-se essencial para a sobrevivência das organizações em um mercado competitivo. Além disso, ter ciência de tais indicadores auxilia na análise da viabilidade dos processos, seja ela econômica ou ambiental. Desse modo, o presente trabalho busca realizar uma análise comparativa entre os três principais processos de obtenção de celulose: o processo mecânico, sulfito e o *kraft*. Para alcançar tal objetivo, foi realizado uma revisão bibliográfica, utilizando a técnica de análise de conteúdo, na categoria da análise comparativa. Avaliando os indicadores econômicos e ambientais de cada processo, observou-se que o processo *kraft* se sobressai aos demais processos, principalmente tratando-se da recuperação química e da sua autossuficiência energética. Conclui-se, portanto, que o processo *kraft* se torna a opção mais viável e mais sustentável entre os demais processos, considerando sua ampla preocupação com fatores ambientais e sua ampla produção de energia e celulose de qualidade superior.

Palavras-chave: processo *kraft*; processo mecânico; processo sulfito; viabilidade de processos de polpação.

Abstract:

In the pulp and paper industry, understanding the advantages and disadvantages of the process to be used becomes essential for the survival of organizations in a competitive market. Furthermore, being aware of such indicators helps in analyzing the viability of processes, whether economic or environmental. Therefore, the present work seeks to carry out a comparative analysis between the three main processes for obtaining cellulose: the mechanical process, sulfite and kraft. To achieve this objective, a bibliographical review was carried out, using the content analysis technique, in the category of comparative analysis. Evaluating the economic and environmental indicators of each process, it was observed that the kraft process stands out from other processes, mainly dealing with chemical recovery and energy self-sufficiency. It is concluded, therefore, that the kraft process becomes the most viable and sustainable option among other processes, considering its broad concern with environmental factors and its extensive production of energy and superior quality cellulose.

Keywords: kraft process; mechanical process; sulfite process; feasibility of pulping processes.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de papel e celulose vem aumentando sua relevância no decorrer do tempo, e seu consumo energético passou de 5% em 1970 para 16% em 2020, com um crescimento médio anual de 5,4% a.a. (EPE, 2020). Apesar da eclosão da pandemia da Covid-19, a produção de celulose no Brasil apresentou um crescimento de 6,6% em 2020 em relação à 2019, se mantendo na segunda posição dos líderes mundiais de produção de celulose, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, como mostrado na tabela 1.

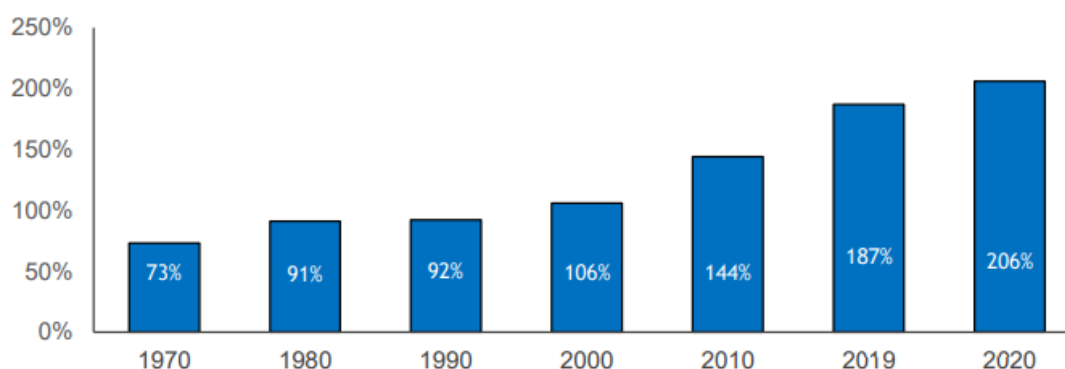
Tabela 1 – Ranking dos maiores produtores de celulose no mundo em 2020

País	Produção (10⁶ t)	% da produção
EUA	50,9	27,4%
Brasil	21,0	11,3%
Canadá	15,4	8,3%
China	14,9	8,0%
Suécia	12,0	6,5%
Finlândia	10,5	5,7%
Rússia	8,8	4,7%
Indonésia	8,4	4,5%
Japão	7,2	3,9%
Chile	5,2	2,8%

Fonte: IBÁ (2021).

A partir de 2000, a produção de celulose passou a se sobrepôr a de papel, aumentando assim a razão entre a produção de celulose e papel (Figura 1). As condições climáticas e uma engenharia florestal desenvolvida favorecem a produção do Brasil, de modo que as indústrias de celulose atinjam patamares elevados de produção e qualidade, competindo em níveis superiores ao mercado mundial. Os avanços tecnológicos vão desde bioengenharia florestal até sistemas automatizados durante o cozimento da madeira e o produto final, o que gera um aumento na escala produtiva, com custos mais reduzidos.

Figura 1: Razão de produção Celulose/Papel no Brasil



Fonte: EPE (2020).

Durante o decorrer da história, muitos processos de polpação foram desenvolvidos, iniciando com o processo mecânico, incorporado desde o século XVIII, onde o método envolvia a trituração da madeira por meio de forças, como moagem e martelagem para ocorrer a separação das fibras de celulose das fibras da madeira. Esse método pioneiro foi gradualmente substituído por processos mais eficientes (Brännvall *et al.*, 2009).

Logo após o processo mecânico, surgiu no século XIX o processo sulfito, onde se utilizava sulfitos alcalinos como bissulfito ou sulfito de cálcio para desfibrar a madeira durante o cozimento. Porém, devido à preocupação ambiental e a formação de produtos químicos residuais, o processo sulfito perdeu notoriedade com o tempo (Sjöström, 1993).

Levando em consideração aspectos ambientais e de redução de consumo energético, o processo de polpação *Kraft* foi desenvolvido em 1879, onde o mesmo revolucionou a indústria de papel e celulose, utilizando uma mistura de compostos químicos como soda cáustica e sulfeto de sódio para separar a celulose da madeira. Tal processo se tornou um dos mais utilizados na indústria de papel e celulose devido a sua eficiência na extração da celulose (Bajpai, 2015).

Visando melhorias no processo de cozimento *kraft*, alguns compostos como a antraquinona e polissulfetos foram implementados no cozimento dos cavacos com a intenção de reduzir o consumo de energia e aumentar a velocidade da reação da deslignificação (Gomide, 1979).

Levando em consideração a relevância econômica e ambiental da produção da celulose e especificamente os pontos positivos e negativos de cada

processo, o objetivo desse trabalho é expor um estudo sobre as vantagens e desvantagens econômicas e ambientais de cada processo. A justificativa para o presente estudo é que tendo o conhecimento das vantagens e desvantagens de cada processo, se pode ter uma melhor tomada de decisão pela indústria de papel e celulose.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

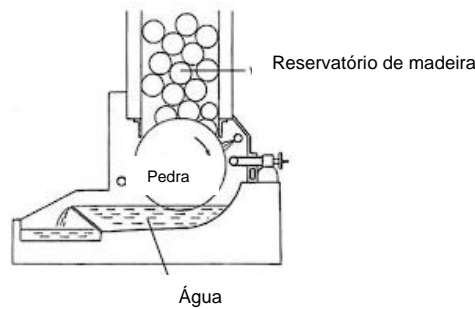
2.1. PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE CELULOSE

A obtenção da celulose é um processo crucial na indústria do papel e de bens de consumo oriundos de celulose, com diferentes métodos sendo desenvolvidos e ampliados ao longo do tempo para atender as demandas variadas. Nesta revisão bibliográfica exploramos três principais processos de polpação utilizados na indústria: Polpação Mecânica, Polpação Sulfito e Polpação *Kraft*. Cada processo possui características únicas que influenciam não só na qualidade da celulose produzida, mas também em considerações econômicas e ambientais.

2.2. O PROCESSO MECÂNICO

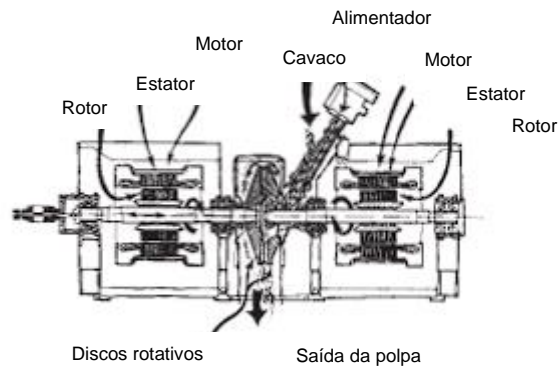
O Processo de polpação mecânica é caracterizado pelo uso de forças físicas, como trituração e moagem para a separação das fibras de celulose da matriz lenhosa. Onde o mesmo é conhecido pela sua eficiência em termos de produção em massa (Sjöström, 1993). Tal processo apresenta um rendimento em torno de 96% a 98%, onde a polpa produzida pode ser obtida através de dois processos comerciais diferentes, onde em um as toras de madeira são processadas em trituradores rotativos e no outro os cavacos são processados em um refinador (Brännvall *et al.*, 2009). A figura 2 e figura 3 ilustram um moedor e um refinador de disco duplo respectivamente.

Figura 2: Moedor de toras de madeira



Fonte: Adaptado de “Pulp and Paper Chemistry and Technology” (2009).

Figura 3: Refinador de disco duplo



Fonte: Adaptado de “Pulp and Paper Chemistry and Technology” (2009).

Durante o processo ilustrado pela figura 2, as toras de madeira são depositadas em um rebolo de pedra giratório, onde as mesmas são pressionadas e ocorre o desfibramento da madeira, tal método produz muitos resíduos sólidos, denominados “Finos” (Brännvall *et al.*, 2009). Já no método em que se utiliza discos rotativos, os cavacos são desintegrados em fibras e fragmentos de fibras onde são segregados por tamanho por uma fenda estreita disposta entre os discos paralelos (Brännvall *et al.*, 2009).

Dessa forma, o papel resultante da polpa obtida pelas fraturas mecânicas da madeira apresenta resistência mecânica muito baixa. Algumas desvantagens adicionais como o alto consumo de energia e a restrita utilização de madeiras macias, como os abetos, são notados na utilização desse método de polpação (Brännvall *et al.*, 2009 e Sjöström, 1993).

No decorrer do tempo, algumas modificações ao método mecânico foram aplicadas, como por exemplo a utilização de vapor para aquecimento inicial tanto nas toras de madeira para processos de moagem, como nos cavacos em processos de refino, o vapor é utilizado para amolecimento da madeira, impactando na mecânica de fratura da madeira a ser processada, onde os diferentes perfis de qualidade da polpa resultante dependem do nível de pré-aquecimento da madeira (Brännvall *et al.*, 2009 e Sjöström, 1993)

2.3 O PROCESSO SULFITO

O processo de polpação sulfito é uma técnica utilizada pela indústria para a produção de celulose através da utilização de uma solução alcalina conhecida como licor sulfito, onde o mesmo é composto por sulfureto de sódio (Na_2S) ou por bissulfito de cálcio ($Ca(HSO_3)_2$) junto de hidróxido de sódio ($NaOH$) ou hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Tal processo ocorre através de reações químicas, onde os grupos sulfito no licor reagem com a lignina na madeira e dissolvendo a mesma, permitindo a separação das fibras de celulose, resultando em uma polpa a ser branqueada posteriormente (Sjöström, 1993).

A principal vantagem do processo sulfito é a produção de uma polpa de celulose com excelentes propriedades, principalmente se tratando de branqueamento, já que o licor sulfito é capaz de solubilizar uma grande quantidade de lignina em solução, resultando em uma polpa de maior qualidade e mais clara (Sjöström, 1993).

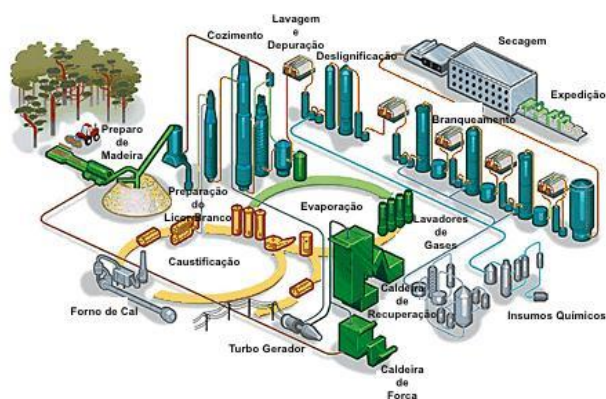
Apesar da sua grande vantagem em relação a propriedades de branqueamento de polpa, o processo sulfito apresenta uma grande desvantagem em relação a aspectos ambientais, tais como um grande consumo de água e de produtos químicos, onde os mesmos não são recuperados e são descartados como resíduos do processo. (Sjöström, 1993).

2.4 O PROCESSO KRAFT

A função do processo *kraft* é dissolver e separar a lignina, composto que liga as fibras da madeira, com o objetivo de se obter fibras livres e com o mínimo de degradação da celulose e hemicelulose. Nas indústrias de celulose mais atuais, existem etapas como: preparo da madeira (Colheita, descascamento e

picagem), cozimento, depuração, lavagem, recuperação química e secagem. (Correia, 2010) A figura 4 ilustra as etapas do processo.

Figura 4: O Processo Kraft



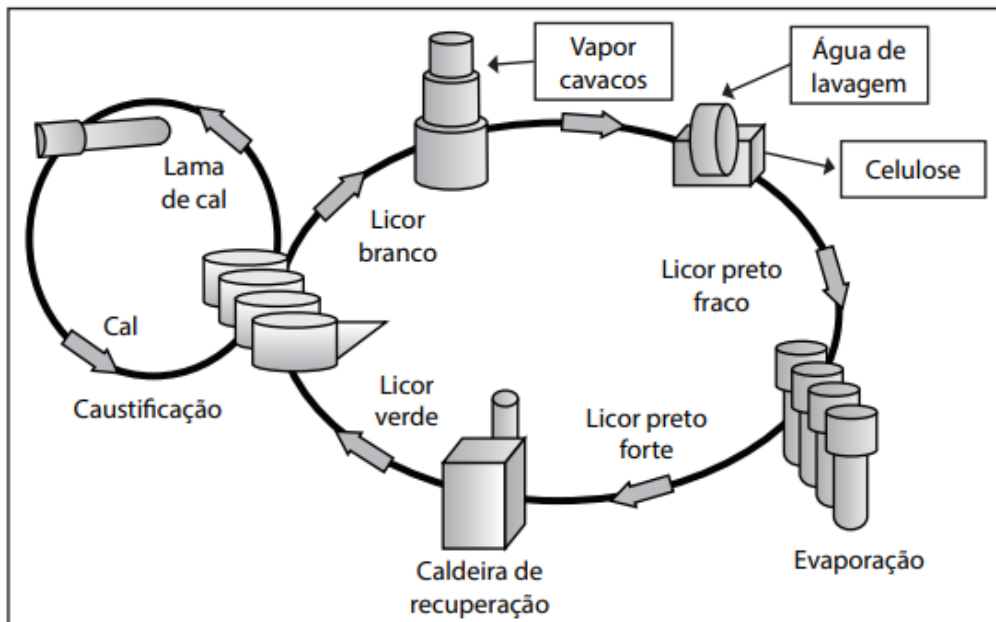
Fonte: Paula (2017).

Após a preparação da madeira (Descascamento e picagem), os pequenos pedaços de madeira (cavacos) são estocados no pátio de madeira, onde serão transportados através de esteiras até os digestores para a etapa do cozimento com o licor branco. Segundo Figueirêdo (2009), o licor branco é uma solução aquosa composto de químicos ativos (hidróxido de sódio ($NaOH$) e sulfeto de sódio (Na_2S)) e por compostos inertes (carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfito de sódio (Na_2SO_3), entre outros). Durante o cozimento, ocorre o consumo do hidróxido de sódio junto da ação do sulfeto de sódio como composto tamponante da reação, onde a mistura permanece em repouso até o fim do cozimento (Neuberger, 2008).

Realizada a etapa do cozimento da madeira pelo digestor, a polpa *kraft* passa por processos de tratamento (lavagem e depuração, deslignificação, branqueamento e secagem) até chegar à expedição, já os químicos resultantes e substâncias dissolvidas formam uma solução aquosa denominado licor negro diluído, que é rico em sais de sódio e lignina, onde o mesmo é direcionado a recuperação química.

O processo de recuperação química *kraft* processa o licor negro diluído, produz vapor para a planta e para a geração de energia, e recupera o licor branco de cozimento, garantindo a viabilidade ambiental e econômica da planta industrial (Melo *et al.*, 2011). A figura 5 demonstra o subprocesso da recuperação química.

Figura 5: Subprocesso de recuperação kraft

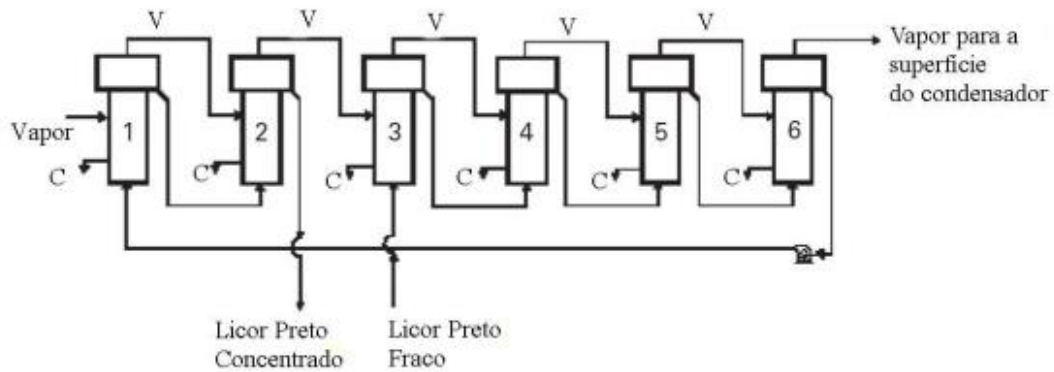


Fonte: Figueirêdo (2009).

O licor negro diluído, com concentração de 15% a 20% de sólidos secos é enviado a primeira etapa do processo, que é a da evaporação, onde ele passa por um sistema de múltiplos efeitos (Múltiplos evaporadores), para elevar a sua concentração de sólidos e se tornar o licor negro concentrado, com teor de 65% a 80% em sólidos secos para que seja enviado para a queima na caldeira de recuperação (Figueirêdo, 2009).

Durante essa etapa, o licor negro diluído é aquecido com o vapor para que ocorra a evaporação da água presente e a consequente aumento a concentração do mesmo. Tal etapa ocorre principalmente através de um sistema misto de evaporadores, onde o vapor utilizado no primeiro efeito é reaproveitado no segundo efeito e assim sucessivamente, ocasionando em um melhor aproveitamento do vapor utilizado. A figura 6 ilustra um sistema misto de evaporadores.

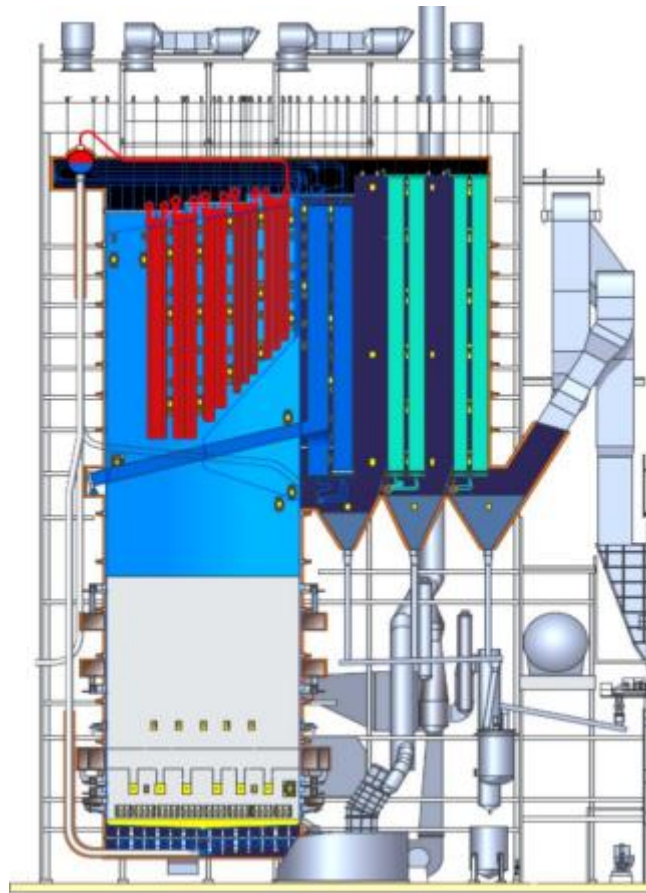
Figura 6: Sistema misto de evaporadores



Fonte: Adaptado de Brännvall *et al.*, 2009.

Após a etapa da evaporação, o licor negro concentrado se destina para queima da sua parte orgânica na caldeira de recuperação, equipamento esse que representa 20% do investimento total da fábrica, apresentando também a maior dimensão entre os demais equipamentos. A figura 5 mostra o projeto de uma caldeira de recuperação, onde apresenta suas estruturas, incluindo a fornalha na parte inferior, e a área onde ocorre o aquecimento da água para a formação de vapor, na área superior.

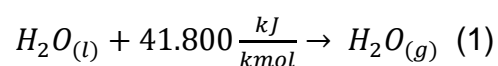
Figura 7: Projeto de uma caldeira de recuperação química



Fonte: Adaptado de Valmet (2017).

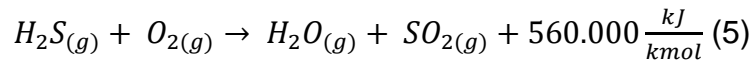
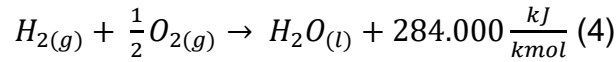
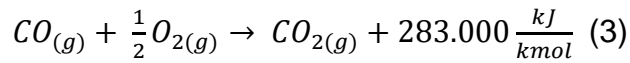
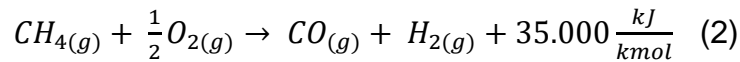
Com a queima do licor concentrado, ocorre a produção de vapor a alta pressão e a recuperação dos compostos químicos presentes no mesmo. O combustível é injetado de forma uniforme dentro da fornalha da caldeira, ocorrendo três etapas principais (Brännvall *et al.*, 2009; Fakhrai, 2002; Ferreira, 2013; Vakkilainen; 2005):

- **Secagem ou vaporização:** etapa responsável pela retirada de todo o residual de água do licor através do processo de vaporização, onde sua reação pode ser descrita pela equação 1;

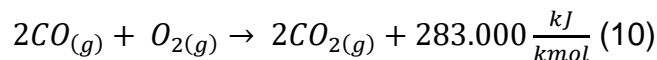
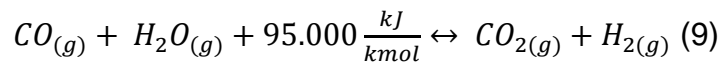
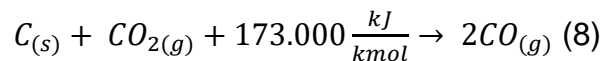
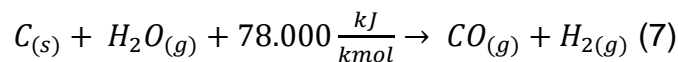
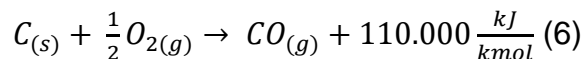


- **Pirólise:** momento em que ocorrem reações não reversíveis, com a deterioração de compostos orgânicos do licor que possuem baixo peso

molecular, como o sulfeto de hidrogênio, o metano, dióxido e monóxido de carbono, evidenciadas pelas equações de 2 a 5.

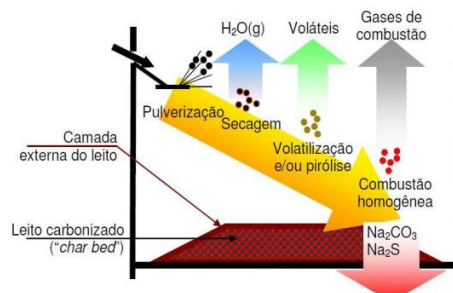


- **Combustão homogênea em duas áreas:** A primeira combustão ocorre acima da área de entrada do licor negro na caldeira, com a presença de gases combustão com a incineração de orgânicos de peso molecular reduzido. Já a segunda combustão ocorre na camada ativa abaixo do local de inserção de licor, necessária para o processo de redução dos químicos e formação do fundido denominado *smelt*. As reações que ocorrem nas duas áreas podem ser representadas pelas equações de 6 a 10.



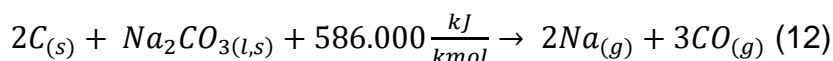
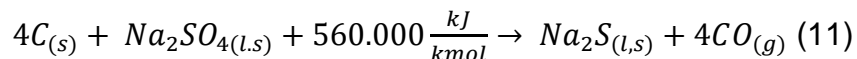
A figura 6 mostra as múltiplas etapas da queima do licor negro, demonstrando como ocorre a sua combustão desde sua inserção dentro da fornalha até sua deposição como carbonato de sódio e sulfato de sódio.

Figura 8: Múltiplas etapas da queima do licor negro



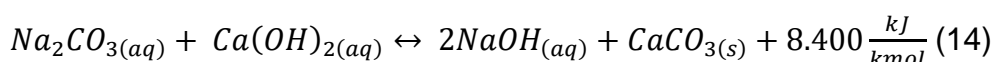
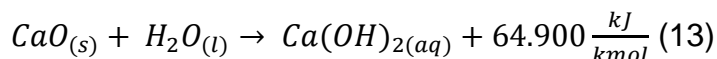
Fonte: Ferreira, 2013.

Na camada ativa ocorrem reduções dos compostos inorgânicos, dos quais utilizam a energia liberada da combustão das equações de 6 a 10. O processo de redução dos compostos inorgânicos pode ser ilustrado nas equações 11 e 12. (Fakhrai, 2002; Ferreira, 2013; Vakkilainen, 2005):



O *Smelt*, rico em carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S) se dirige até a caustificação, onde o carbonato de sódio (Na_2CO_3) irá se converter em hidróxido de sódio ($NaOH$). A caustificação recebe o licor verde (*smelt* hidratado) e o mistura com cal, onde a sua composição apresenta aproximadamente 92% de óxido de cálcio (CaO), 2% carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e 6% de compostos como sílica e o óxido de ferro (Reis, 2013).

A água presente em solução reage com o óxido de cálcio realizando a hidratação da cal, originando hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que reage quase que imediatamente com o carbonato de sódio (Na_2CO_3), produzindo hidróxido de sódio ($NaOH$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (Hoking, 2006). As reações podem ser descritas pelas equações 13 e 14.



O hidróxido de sódio obtido pela caustificação é mandado para o digestor para se transformar em licor de cozimento da madeira, encerrando o ciclo de recuperação química e viabilizando o processo.

2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS ECONÔMICAS E AMBIENTAIS

Segundo Sjöström (1993), a produção de pastas *kraft* aumentou consideravelmente desde a década de 1960, em relação as pastas sulfito devido a vários fatores, dentre eles a recuperação de químicos e a melhor propriedade da pasta em relação a necessidade do mercado.

Sjöström (1993) e Smook (2002) ressaltam também que a produção em grande escala de gases mal cheirosos e o elevado consumo de compostos

químicos para branqueamento são pontos ambientais e econômicos negativos ao processo *kraft*.

Por outro lado, a ampla gama de utilização de madeiras e a geração de energia através da queima de licor negro nas caldeiras de recuperação viabiliza o processo *kraft* economicamente (Smook, 2002).

Diferentemente da polpa sulfito tradicional que não apresenta sistema de recuperação do licor residual do processo, onde o mesmo é descartado do processo sem o devido tratamento podendo gerar grandes problemas ambientais e custos elevados (Brännvall *et al.*, 2009; Smook, 2002).

Tanto o processo sulfito como o processo *kraft* apresentam polpas de alto valor de mercado e boa propriedade branqueadora, sendo a polpa sulfito ainda mais clara que a *kraft* (Smook 2002).

Em se tratando de rendimento de polpa, Brännvall *et al.* (2009), Sjöström (1993) e Smook (2002) e ressaltam que o processo mecânico é o que apresenta o maior rendimento, entre 90% a 97% da madeira utilizada, resultando em uma polpa mais fraca, com fibras curtas.

Por outro lado, o alto consumo de energia no processo e a gama de madeiras utilizadas ser limitada a apenas madeiras macias, demonstra um ponto negativo em um aspecto econômico (Brännvall *et al.* (2009); Sjöström (1993); Smook (2002)).

Um outro ponto negativo ao processo mecânico de polpação é a necessidade de tratamento das grandes quantidades de resíduos sólidos resultantes no final do processo, o que pode vir a acarretar problemas ambientais. (Sjöström, 1993).

Desse modo, quando se tem noção das vantagens e desvantagens de cada processo, econômicos e ambientais, se tem uma melhor base para tomada de decisão de acordo com as necessidades de mercado, entre outros fatores. A tabela 2 e 3 apresentam as vantagens e desvantagens, econômicas e ambientais, dos processos citados, respectivamente.

TABELA 2 – VANTAGENS E DESVANTAGENS ECONOMICAS DOS PROCESSOS

PROCESSO	VANTAGENS ECONOMICAS	DESVANTAGENS ECONOMICAS
MECÂNICO	<ul style="list-style-type: none"> • Alto rendimento; • Baixo custo de investimento; 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de energia; • Necessidade de tratamento de resíduos sólidos; • Utiliza apenas madeiras macias;
SULFITO	<ul style="list-style-type: none"> • Polpas de alto valor de mercado; • Utiliza diversos tipos de madeira como matéria-prima 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado com compostos químicos; • Não recuperação dos compostos químicos; • Custos adicionais com equipamentos e infraestrutura;
KRAFT	<ul style="list-style-type: none"> • Polpas de alto valor de mercado; • Utiliza diversos tipos de madeira como matéria-prima; • Recuperação de compostos químicos; • Autossuficiência elétrica; 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos elevados com compostos para branqueamento; • Custos adicionais com equipamentos e infraestrutura;

Fonte: Aatoria Própria

TABELA 3 – VANTAGENS E DESVANTAGENS AMBIENTAIS DOS PROCESSOS

PROCESSO	VANTAGENS AMBIENTAIS	DESVANTAGENS AMBIENTAIS
MECÂNICO	<ul style="list-style-type: none"> • Quase não utiliza compostos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de tratamento de resíduos sólidos
SULFITO	<ul style="list-style-type: none"> • Menor volume de efluentes líquidos em comparação ao processo <i>kraft</i>; • Menor utilização de produtos químicos em comparação ao processo <i>kraft</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissão de gases poluentes e mal cheirosos; • Não recuperação de químicos no processo;
KRAFT	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperação de químicos do processo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissão de gases poluentes e mal cheirosos;

Fonte: Aatoria Própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como fundamento o referencial da pesquisa bibliográfica, que consiste na análise da literatura científica para levantamento e avaliação do que já foi produzido sobre determinado tema. Englobou as atividades gerais de identificação, compilação, fichamento, análise e interpretação de documentos científicos. As contribuições científicas abrangem de 1950 até os dias atuais, já que literaturas científicas que retratam do processo de polpação mecânica são mais antigas.

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica das contribuições científicas em polpação de celulose, através de um levantamento nas bibliotecas eletrônicas SciELO, Banco de Teses Unesp. Foram encontradas 68 fontes na base de dados Scielo, 209 fontes no Banco de Teses da Unesp através da utilização da palavra chave “polpa *kraft*”. No entanto, ao acrescentar a palavra chave “polpa mecânica” ou “polpa sulfito”, esse número reduziu para dois na Scielo, 34 no Banco de teses da Unesp.

Com o propósito de não obter sobreposição de material, foi realizado um refino com a comparação das produções disponíveis nas duas bases de dados, resultando em um número de 22 publicações. Desse modo, houve a leitura das publicações e a análise das informações, resultando na síntese das ideias apresentadas.

Além das fontes científicas citadas, também foram consultados três livros fundamentais que forneceram informações valiosas sobre o tópico em questão. O primeiro livro, “*Pulping Chemistry and Technology*”, de Monika Ek., atribuiu pontos muito importantes que tratam sobre os processos de polpação mecânico, sulfito e *kraft*. O segundo, “*Handbook for Pulp & Paper Technologists*”, de Gary A. Smook, ampliou ainda mais a compreensão do tema, apresentando de forma abrangente cada processo e suas peculiaridades. Por fim, “*Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*”, de Eero Sjöström, que apresentou de forma detalhada alguns pontos sobre o tema, incluindo a etapa química de cada processo.

Para a análise dos dados, foi utilizada a técnica de Análise de Conteúdo, na categoria de Análise Comparativa. Inicialmente foi realizada uma leitura exploratória das produções, para que em seguida ocorresse a retirada das informações essenciais de cada processo, relacionadas às vantagens e

desvantagens de cada um deles e conseqüentemente ser realizada uma comparação entre tais informações para fundamentar, através da saturação, o que se tem na literatura.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste segmento, vamos avaliar em detalhes os indicadores econômicos e ambientais resultantes da análise dos diferentes processos de polpação de celulose citados anteriormente. Tais indicadores desempenham um papel fundamental na avaliação de viabilidade econômica do processo e no impacto ambiental do mesmo (Quiroga, 2005).

4.1 INDICADORES ECONÔMICOS

O rendimento da polpa, um parâmetro crucial na produção de celulose, é um elemento de comparação entre tais processos. O processo mecânico é caracterizado por apresentar um alto rendimento (aproximadamente 97%), em comparação aos outros processos, porém a polpa produzida tende a apresentar a menor qualidade entre os processos. Desse modo, considerando polpas de alta qualidade e boas propriedades, temos que o processo *kraft* é o que apresenta o maior rendimento (aproximadamente 45%) em comparação ao processo sulfito (aproximadamente 40%) (Brännvall *et al.*, 2009; Smook, 2002; Vasconcelos, 2005). Sobretudo, o processo *kraft* apresenta o aproveitamento da biomassa (cascas, restos de raízes e folhagens) gerada após o processamento (55% da matéria-prima) para a geração de energia elétrica (Jornal da USP, 2023).

Além do rendimento, o consumo de matéria-prima é outro fator de extrema importância entre os processos de extração da celulose. O processo *kraft* apresenta um alto consumo de matéria prima, já que seu rendimento de polpa também é elevado em relação ao processo sulfito, que apresenta um consumo de matéria prima moderado. Em contrapartida, o processo mecânico apresenta um menor consumo de insumos florestais por ser um processo que se utiliza de forças mecânicas para a separação da fibra, o que maximiza o rendimento com o baixo consumo de madeira (Brännvall *et al.*, 2009; Sjöström, 1993; Smook, 2002).

Outro indicador importante a ser considerado é o consumo energético de cada processo. O processo kraft demanda um maior consumo de energia devido as etapas de evaporação e secagem, além dos grandes equipamentos que utilizam muita energia elétrica, assim como no processo mecânico. Já o processo sulfito utiliza uma quantidade moderada de energia para seu funcionamento, onde necessita de pressões e temperaturas mais baixas (Brännvall *et al.*, 2009; Sjöström, 1993; Smook, 2002).

Além disso, o único dos três processos que apresenta a capacidade de ser autossuficiente energeticamente é o processo kraft, que consegue gerar vapor com a queima de licor negro nas caldeiras de recuperação e com a queima da biomassa na caldeira de força, e utilizar esse vapor no processo e na geração de energia elétrica através das turbinas geradoras (Foelkel, 2019; Smook, 2002).

Desse modo, considerando os indicadores econômicos de cada processo, podemos construir duas tabelas comparativas entre os processos e seus indicadores econômicos, afim de avaliar e comparar os dados de cada um deles. As tabelas 4 e 5 apresentam tais dados dos processos.

TABELA 4 – INDICADORES ECONÔMICOS DOS PROCESSOS

PROCESSO	INDICADORES ECONÔMICOS	
	RENDIMENTO (%)	CONSUMO DE MATÉRIA-PRIMA
MECÂNICO	97%	BAIXO
SULFITO	40%	MODERADO
KRAFT	45%	ALTO

Fonte: Aatoria Própria

TABELA 5 – INDICADORES ECONÔMICOS DOS PROCESSOS

PROCESSO	INDICADORES ECONÔMICOS	
	CONSUMO ENERGÉTICO	AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA
MECÂNICO	ALTO	NÃO APRESENTA
SULFITO	MODERADO	NÃO APRESENTA
KRAFT	ALTO	APRESENTA

Fonte: Aatoria Própria

4.2 INDICADORES AMBIENTAIS

Após uma avaliação abrangente dos indicadores econômicos associados a cada processo de polpação, é essencial o conhecimento dos indicadores ambientais associados a cada um deles.

A sustentabilidade é uma preocupação cada vez mais presente na indústria de papel e celulose, onde compreender como cada processo de extração de celulose possa vir a impactar ao ambiente torna-se uma atividade vital para a sobrevivência das grandes plantas de extração de celulose (Afonso, 2006).

O consumo de água no processo é um indicador ambiental importantíssimo de cada processo, pois, através dele podemos avaliar qual a quantidade de água que será captada de mananciais e qual é o impacto ambiental dessa captação (Brännvall *et al.*, 2009; Smook, 2002).

Os processos *Kraft* e Sulfito apresentam um consumo moderado de água quando comparados ao processo mecânico, já que os mesmos utilizam a água em suas reações químicas. Tal consumo associado com a eficiência do reaproveitamento da água, faz com que os três processos não desperdicem água e nem captem mais do que o mínimo necessário para seu funcionamento (Smook, 2002).

Além disso, o descarte e tratamento de resíduos químicos e sólidos do processo é outro fator fundamental a ser considerado, já que quanto maior o descarte de resíduos ao ambiente, maior o impacto ambiental.

O processo *kraft* apresenta o menor descarte de resíduos químicos, com sua capacidade de recuperação de químicos através da queima do licor negro residual nas caldeiras de recuperação. Já o processo Sulfito apresenta um descarte de resíduos químicos moderado em relação aos demais processos, já que não apresenta a etapa de recuperação de químicos no processo, necessitando do tratamento do licor residual. Enquanto o processo mecânico não apresenta descarte de resíduos químicos, já que não utiliza do mesmo (Brännvall *et al.*, 2009; Smook, 2002).

Entretanto, o processo mecânico apresenta um grande volume de descarte de resíduos sólidos, como fibras não aproveitáveis e materiais indesejados, diferentemente dos outros dois processos que quase não apresentam descarte de resíduos sólidos ao ambiente (Brännvall *et al.*, 2009).

Outro indicador ambiental importantíssimo é a emissão de gases poluentes durante a extração da celulose, onde a mesma delimita custos adicionais em tecnologias de controle de emissões para evitar um grande impacto ambiental. Desse modo, podemos caracterizar os processos *kraft* e

sulfito apresentam uma emissão moderada de gases poluentes, como dióxido de enxofre, diferentemente do processo mecânico que apresenta baixa emissão de gases poluentes de enxofre (Jawjit, 2007; Smook, 2002).

A partir da análise dos indicadores ambientais, podemos construir duas tabelas comparativas que relacionam os processos com seus indicadores ambientais, afim de melhor avaliar seus impactos. As tabelas 6 e 7 ilustram essa comparação.

TABELA 6 – INDICADORES AMBIENTAIS DOS PROCESSOS

PROCESSO	INDICADORES AMBIENTAIS	
	CONSUMO DE ÁGUA	DESCARTE DE RESÍDUOS QUÍMICOS
MECÂNICO	BAIXO	BAIXO
SULFITO	MODERADO	MODERADO
KRAFT	MODERADO	BAIXO

Fonte: Autoria Própria.

TABELA 7 – INDICADORES AMBIENTAIS DOS PROCESSOS

PROCESSO	INDICADORES AMBIENTAIS	
	DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS	EMIÇÃO DE GASES POLUENTES
MECÂNICO	ALTO	BAIXA
SULFITO	BAIXO	MODERADA
KRAFT	BAIXO	MODERADA

Fonte: Autoria Própria

4.3 ANÁLISE DOS INDICADORES

A análise dos indicadores econômicos e ambientais revela que o processo de polpação *kraft* se resalta de forma notável perante os demais processos. A avaliação cuidadosa de diversas fontes confirma sua superioridade e justifica a sua ampla utilização na indústria de papel e celulose.

O processo *kraft* apresenta uma grande vantagem econômica quando comparado aos outros processos. A sua eficiência na recuperação de compostos químicos do processo e na utilização de recursos é um aspecto proeminente, mesmo considerando um rendimento inferior aos 50%.

A reutilização do licor negro e de biomassa, como subprodutos do processo, não só auxilia na minimização do desperdício, mas também gera uma fonte de receita adicional com a venda da energia, além de garantir a sua autossuficiência energética e inibir seu alto consumo de energia. Desse modo,

pode-se reduzir os custos de produção e tornando o processo mais competitivo no mercado em relação aos demais processos.

Além disso, o processo *kraft* se releva favorável ao avaliarmos indicadores ambientais como descarte de resíduos químicos e sólidos ao meio ambiente que trabalha em conjunto da recuperação de químicos, tornando inegável a sustentabilidade ambiental de tal processo. Entretanto, seu consumo de água moderado e a emissão de gases poluentes faz com que seja necessário o investimento em tecnologias para tratamento de água e controle da emissão desses gases.

Em resumo, nossa análise ressalta que o processo *kraft* é o método superior, considerando seus indicadores econômicos e ambientais. Sua capacidade de conciliar a eficiência econômica e processual, junto de práticas sustentáveis o coloca em uma posição elevada na indústria de papel e celulose, sendo reforçada pela produção de uma polpa de altíssima qualidade e propriedades.

5 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica desenvolvida nesse estudo permitiu o conhecimento sobre os três processos principais de polpação da celulose, o processo mecânico, Sulfito e o *Kraft*, permitindo uma análise comparativa crítica considerando as vantagens e desvantagens econômicas e ambientais de cada um deles. Os resultados apontam para o processo *kraft* como a melhor escolha entre os demais, evidenciada pela sua eficiência econômica e sua preocupação contínua com a redução do impacto ambiental.

O processo *kraft* se sobressalta considerando aspectos econômicos, como evidenciado pelos indicadores avaliados acima. Sua capacidade de recuperar compostos químicos juntamente da reutilização eficaz dos recursos, resulta em uma redução substancial dos custos de produção, além da capacidade de autossuficiência energética e venda de excedente de energia elétrica. Estes fatos por si só já atribuem ao processo *kraft* uma grande vantagem competitiva perante os outros processos. Além disso, a qualidade da celulose produzida por tal processo é de altíssima qualidade e é amplamente reconhecida.

Além da sua vantagem econômica, o processo se destaca na frente ambiental. Sua ampla recuperação de produtos químicos, junto da utilização do

licor negro como fonte energética, contribui para uma redução da emissão de gases poluentes, acompanhada de um descarte quase nulo de resíduos químicos e resíduos sólidos ao ambiente.

A busca pela minimização da poluição e na redução de impactos ambientais são pontos presentes no processo, tornando o mesmo uma escolha responsável e consciente para as fábricas de celulose.

Em uma visão global, considerando que a preservação do meio, sustentabilidade e eficiência econômica são metas inseparáveis, a evidência acumulada nesta revisão bibliográfica enfatiza de maneira sólida a superioridade do processo *kraft*. No entanto, é importante salientar que cada processo tem seu lugar e utilidade, dependendo das necessidades e considerações individuais.

Como a busca por processos industriais mais eficientes e ecológicos se mantem, o processo kraft permanece como uma fonte de referência e inspiração para as gerações futuras de pesquisadores e profissionais da indústria.

REFERÊNCIAS

AFONSO, C. M. **Sustentabilidade** – Caminho ou Utopia? São Paulo: Annablume, 2006.

BAJPAI, Pratima. **Pulp and Paper Industry: Microbiological Issues in Papermaking**. Amsterdam: Elsevier, 2015.

BEN 50 anos. **EPE**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/BEN%2050%20anos.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

BRÄNNVALL, E. et al. **Pulp and Paper Chemistry and Technology**. Vol. 2. Stockholm: DE GRUYTER, 2009.

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. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/5900>. Acesso em: 23 de janeiro de 2023.

ESTANISLAU, Julia. Produção de energia elétrica a partir de rejeitos aumenta a eficiência da indústria de celulose. **Jornal da USP**, 20 de outubro de 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/producao-de-energia-eletrica-a->

[partir-de-rejeitos-aumenta-a-eficiencia-da-industria-de-celulose/](#). Acesso em: 28 de novembro de 2023.

FAKHRAI, Reza. **Black Liquor Combustion in Kraft Recovery Boilers-Numerical Modelling**. 2002. 24 f. Tese (Doutorado) - Department of Material Science and Engineering Division of Energy and Furnace Technology Royal Institute of Technology. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9138/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

FERREIRA, Daniel José de Oliveira. **Modelagem de Caldeira de Recuperação Química Kraft**. 2013. 209 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26072013-122445/pt-br.php>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

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. **Longa Vida ao Processo kraft**. 2019. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2019_Longa_Vida_Processo_Kraft.pdf. Acesso em: 9 de janeiro de 2023.

GOMIDE, J.L; OLIVEIRA, R.C. Eficiência da antraquinona na polpação alcalina de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 3, n. 2, p. 208-220, julho a dezembro, 1979.

HOCKING, **Martin B. Handbook of Chemical Technology and Pollution Control**. 3st ed. Academic Press, 2006.

JAWJIT. W.; KROEZE, C.; SOONTARANUN, W,; HORDIJK, L. **Options to reduce the environmental impact by Eucalyptus-based Kraft pulp industry in Thailand: Model Description**. 2007. v.15, n. 18.

MELO, J. R. et al. Estudo das características do licor preto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2011. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11302/209209209314>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2023.

NEUBERGER, Reinaldo. **Boas práticas De Operação e Manutenção Para Redução De Odores Na Produção De Celulose Kraft: Uma abordagem Qualitativa**. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, São Caetano do Sul. Disponível em <http://maua.br/files/dissertacoes/boaspraticas-de-operacao-e-manutencao.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

PAULA, K. R. de. **Análise da sulfidez no processo kraft em uma indústria de celulose**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16559/1/PG_COENQ_2017_2_16.pd. Acesso em 30 de abril de 2023.

QUIROGA M.R. **Estatísticas del medio ambiente em América Latina y el Caribe**: avances y perspectivas. Chile: Cepal, 2005. Series Manuales.

REIS, Haroldo Marinho. **Análise Exergética e Ambiental do Processo de Obtenção do Licor de Cozimento Kraft para Extração de Celulose**. 2013. 140f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá UNIFEI, Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Mecânica, Itajubá. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/824/dissertacao_reis_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12 de maio de 2023.

RELATÓRIO Anual IBÁ 2021. **IBÁ**, 2021 Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2023.

SJÖSTRÖM, Eero. **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**. Espoo: Academic Press Inc., 1993.

SMOOK, Gary A. **Handbook for Pulp & Paper Technologists**. Vancouver: Angus Wilde Publications Inc., 2002.

VAKKILAINEN, Esa K. **Kraft recovery boilers - Principles and Practice**. Suomen soodakattilayhdistys r.y. 2005. Disponível em: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/111915/KRBFULL.pdf?sequence=2&isAllowed>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

VALMET. **Technical Paper Series.** 2017. Disponível em https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/xxl_size_recovery_boilers_whitepaper.pdf Acesso em 10 de maio de 2023.

VASCONCELOS, Fernando Soares Ribeiro de. **Avaliação do processo SuperBach de polpação de Pinus taeda.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20191218-174612/> Acesso em: 15 de novembro de 2023.