



**HAMILTON MARTINS RAMOS**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NA POLPAÇÃO KRAFT PARA  
PRODUÇÃO DE CELULOSE BEKP**

**LAVRAS – MG  
2023**

**HAMILTON MARTINS RAMOS**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NA POLPAÇÃO KRAFT PARA PRODUÇÃO DE  
CELULOSE BEKP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ramos, Hamilton Martins.

Análise do ciclo de vida na produção Kraft para produção de  
celulose BEKP / Hamilton Martins Ramos. - 2023.

58 p. : il.

Orientador(a): Márcio Montagnana Vicente Leme.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Análise do ciclo de vida. 2. Polpação Kraft. 3. Linha de  
Fibras. I. Leme, Márcio Montagnana Vicente Leme. II.

**HAMILTON MARTINS RAMOS**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NA POLPAÇÃO KRAFT PARA PRODUÇÃO DE  
CELULOSE BEKP**

**LIFE CYCLE ASSESSMENT IN KRAFT PULPING FOR BEKP PULP  
PRODUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 21 de dezembro de 2023.  
Dra. Cristiana Pirola Narimatsu – AEMS  
Dr. Lorrان de Sousa Arantes – UFLA

  
Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, à Deus pelas portas abertas e oportunidades pelo caminho até aqui. Aos meus pais, Venâncio e Terezinha, por me propiciarem além da dádiva da vida, condições de perseverar frente às adversidades e vislumbrar objetivos antes inimagináveis.

À minha família, Rosa Helena, Thiago e Bruna, por acreditarem sempre em meus propósitos e permanecerem presente nos bons e maus momentos, compartilhando forças para avançar pelos degraus nesta jornada acadêmica e na vida.

Aos meus colegas de trabalho da Companhia Suzano Papel e Celulose Unidade Três Lagoas que contribuíram diretamente ou indiretamente no presente trabalho, em especial ao senhor Cleyton Gil Ferreira por acreditar no desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador professor Márcio Montagnana Vicente Leme pelos ensinamentos, por acreditar no trabalho e me inspirar a seguir em frente.

À Universidade Federal de Lavras, pelo conhecimento científico, desenvolvimento pessoal e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento de recursos para a realização do trabalho.

*“Aprender é a única coisa que a mente nunca envelhece, nunca tem medo e nunca se arrepende”*

*(Leonardo da Vinci)*

## RESUMO

A polpação Kraft é o processo de produção celulósica mais difundido e utilizado na produção de papel no mundo. Este processo engloba a digestão da madeira em solução de sulfeto de sódio e hidróxido de sódio, deslignificação, depuração e lavagem, branqueamento, secagem e recuperação química. As indústrias de papel e celulose sempre foram consideradas um forte setor para a economia desde o século XVIII, entretanto, apenas a partir da década de 60 iniciou-se a implementação do raciocínio científico no processo de fabricação. Com a revolução científica e tecnológica veio a tarefa de reconhecer os impactos ambientais significativos dos usos de recursos não renováveis e suas emissões para a atmosfera e corpos d'água. A ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é baseada na determinação de encargos associados a um produto, serviço ou processo, desde seu início até o descarte, ou seja, tem um papel fundamental na avaliação e tomada de decisões quanto à relação indústria e meio ambiente. O intuito do presente estudo foi identificar e avaliar os impactos ambientais resultantes da produção de celulose, da indústria Suzano Papel e Celulose Unidade Três Lagoas - MS. Dentro da metodologia da ACV descritas no artigo, foi utilizado o método de ACV ReCiPe midpoint através do software SimaPro para processamento dos dados. Destaca-se que foi verificado um impacto positivo quando ao aquecimento global devido ao plantio de eucalipto utilizado para a produção da celulose, mostrando negativo valor do balanço em termos de Kg CO<sub>2</sub> equivalente. Para futuros trabalhos é recomendado mostrar outro cenário com os controles de emissão para confrontar com os dados gerados no presente trabalho, assim como outros processos de polpação

**Palavras-chave:** Processo kraft; recuperação química; avaliação impactos ambientais.

## ABSTRACT

Kraft pulping is the most widespread and utilized process for cellulosic production and is extensively used in the manufacturing of paper products around the world. This process involves digesting wood in a solution of sodium sulfide and sodium hydroxide, followed by delignification, purification and washing, bleaching, drying and chemical recovery. and washup, and washing, bleaching, drying and chemical recovery. The cellulose and paper industries have long been considered strong contributors to the economy since 18th century, however, it wasn't until the 1960s that the implementation of scientific reasoning in the manufacturing process began. With the scientific and technological revolution, came the task of recognizing the significant environmental impacts of using non- renewable resources and their emissions into the atmosphere and bodies of water. The tool of life cycle assessment (LCA) is based on determining the environmental burdens associated with a product, service or process, from inception to the disposal, in other words, it plays a fundamental role in the evaluation and decision-making concerning industry and natural environment. The purpose of this study was to identify and evaluate which environmental impacts are connected to the production of cellulose at the Suzano Papel e Celulose Três Lagoas Unit - MS. Within the LCA methodology described in the article, the ReCiPe midpoint LCA method was used through the SimaPro software for data processing. It is noteworthy that there was a positive impact on global warming due to the planting of eucalyptus used for cellulose production, showing a negative balance value in terms of Kg CO<sub>2</sub> equivalent. For future work, it is recommended to show another scenario with emission controls to compare with the data generated in the present work, as well as other pulping processes.

**Keywords:** Kraft process; chemistry recovery; assessment of environmental impacts.



## **INDICADORES DE IMPACTO**

O objetivo deste trabalho foi avaliar através da análise do ciclo de vida, os possíveis impactos ambientais causados por uma indústria de celulose, para isto, foi utilizado o software SIMAPRO disponibilizado pela UFLA, onde foram inseridos dados coletados da cadeia produtiva de uma indústria de polpa celulósica kraft. Os resultados obtidos na indústria analisada, que se localiza na cidade de Três Lagoas no MS, mostraram que as emissões estão dentro da legislação vigente do estado, isso se deve à investimentos em tecnologias modernas, à programas de tratamento e reaproveitamento de resíduos, à envio de gases poluentes para tratamento e posterior queima em caldeira para geração de energia e melhorias contínuas no processo produtivo. Os resíduos gerados na etapa de caustificação juntamente com os resíduos gerados na estação de tratamento de efluentes, são tratados e transformados em corretivos de acidez do solo, utilizados na própria plantação de eucaliptos e parte deste composto é doado para agricultores locais. O software também apresentou um valor negativo na emissão de CO<sub>2</sub> que se deve ao plantio de eucaliptos na região. O fechamento do circuito do sistema de produção com o decorrer dos anos, propiciou uma indústria menos poluidora a partir dos anos noventa e com as metas ambientais estabelecidas para serem alcançadas a curto prazo, fez com que as empresas se preocupem em realizar uma produção cada vez mais sustentáveis.

## **IMPACT INDICATORS**

The objective of this study was to evaluate, through life cycle analysis, the potential environmental impacts caused by a cellulose industry. For this purpose, the SIMAPRO software provided by UFLA was used, where data collected from the production chain of a kraft pulp industry were inputted. The results obtained from the analyzed industry, located in the city of Três Lagoas, MS, showed that emissions are within the current legislation of the State. This is due to investments in modern technologies, waste treatment and reuse programs, sending pollutant gases for treatment and subsequent burning in boilers for energy generation, and continuous improvements in the production process. The wastes generated in the causticizing stage, along with the wastes generated in the effluent treatment station, are treated and transformed into soil acidity correctors, used in the eucalyptus plantation itself, and part of this compound is donated to local farmers. The software also showed a negative value in CO<sub>2</sub> emissions due to eucalyptus planting in the region. The closing of the production system circuit over the years has led to a less polluting industry since the 90`s with short-term environmental goals established to be achieved, companies are increasingly concerned with conducting more sustainable production.

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE

Figura 1 - Impactos ambientais quanto ao potencial de aquecimento global em diferentes estágios.....	52
Figura 2 - Impactos ambientais quanto a formação de material particulado fino (PM 2.5) em diferentes estágios.....	53
Figura 3 - Impactos ambientais quanto a toxicidade humana carcinogênica em diferentes estágios.....	54
Figura 4 - Entradas e saídas do processo de preparação de madeira.....	54
Figura 5 - Impactos ambientais quanto a formação de ozônio (saúde humana) em diferentes estágios.....	55
Figura 6 - Impactos ambientais quanto a acidificação terrestre em diferentes estágios.....	56

## **LISTA DE TABELAS**

### **PRIMEIRA PARTE**

Tabela 1 - Ranking dos dez maiores exportadores mundial em celulose 2020.....16

### **SEGUNDA PARTE**

Tabela 1 - Caracterização e quantificação das entradas e saídas do processo proposto.....49

Tabela 2 - Parâmetros usados em cada categoria de impacto.....51

## SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE .....	14
1 INTRODUÇÃO .....	14
2 OBJETIVOS .....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO .....	16
3.1 INTRODUÇÃO .....	16
3.2 Papel e celulose no estado do Mato Grosso de Sul.....	18
3.3 Processo de polpação Kraft.....	19
3.3.1 Linha de fibras .....	19
3.3.1.1 Preparação da madeira e pilha de cavacos .....	20
3.3.1.2 Digestor.....	20
3.3.1.3 Deslignificação por O <sub>2</sub> .....	22
3.3.1.4 Depuração e lavagem.....	23
3.3.1.5 Branqueamento .....	23
3.3.1.6 Secagem .....	23
3.3.1.7 Enfardamento .....	24
3.3.2 Recuperação química e utilidades.....	24
3.3.2.1 Evaporação de múltiplos estágios .....	24
3.3.2.2 Caldeira de recuperação química .....	24
3.3.2.3 Caustificação .....	25
3.3.2.4 Forno de cal.....	25
3.3.2.5 Turbo geradores (geração e distribuição de energia elétrica) .....	26
3.3.2.6 Estação de tratamento de água (ETA).....	27
3.3.2.7 Estação de tratamento de água para caldeiras (ETAC).....	28
3.3.2.8 Estação de tratamento de efluentes (ETE) .....	29
3.4 Geração de resíduos no processo de polpação Kraft .....	30
3.4.1 Resíduos líquidos .....	30
3.4.2 Resíduos gasosos .....	31
3.4.3 Resíduos sólidos .....	31
3.4.3.1 Biomassa de eucalipto.....	31
3.4.3.2 Dregs e grits .....	31
3.4.3.3 Lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE).....	32
3.4.3.4 Lodo da estação de tratamento de água (ETA).....	32
3.4.3.5 Cinzas da caldeira de biomassa.....	33
3.5 Aproveitamento de resíduos do processo Kraft.....	33

3.6 Análise do Ciclo de Vida (ACV).....	35
3.6.1 Definição do escopo.....	36
3.6.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) e interpretação.....	36
3.6.3 Método ReCiPe.....	38
REFERÊNCIAS.....	39
SEGUNDA PARTE .....	46
ARTIGO – “ Análise do ciclo de vida em uma planta de produção de polpa celulósica kraft a partir do eucalipto utilizando o software SiMaPro” (versão preliminar).....	46
1 Introdução .....	46
2 Metodologia .....	46
2.1 Definição do objetivo e escopo.....	47
2.2 Descrição e limites do sistema do produto .....	47
2.3 Unidade funcional.....	48
2.4 Avaliação de impacto.....	48
2.5 Requisitos de qualidade dos dados .....	48
2.6 Análise do inventário .....	48
2.7 Avaliação de impacto.....	51
3 Resultados.....	52
3.1 Aquecimento global .....	52
3.2 Formação de material particulado fino .....	53
3.3 Toxicidade humana carcinogênica.....	53
3.4 Formação ozônio (ecossistemas terrestres e saúde humana).....	54
3.5 Acidificação terrestre .....	55
4 Conclusão.....	56
REFERÊNCIAS.....	58

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

As empresas de celulose crescem no Brasil em ritmo acelerado, e com a preocupação com o meio ambiente e a obrigatoriedade em seguir os protocolos das legislações ambientais faz se necessário o conhecimento de cada etapa do processo produtivo para evitar danos ao meio ambiente sem perder a qualidade dos produtos produzidos. Detalhar o processo produtivo pode ajudar a identificar o uso de recursos, mostrar onde aspectos mais sustentáveis poderiam ser substituídos, aliando a sustentabilidade à fabricação do produto.

No processo industrial para obtenção de polpa de celulose, o processo químico Kraft é o mais utilizado atualmente, por possuir melhores custos e benefícios para as fábricas de papel e celulose no Brasil. Obtido através da deslignificação dos cavacos de madeira a partir da solução com hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. A.K. Eaton obteve em 1870 e 1871 as primeiras patentes do processo (Soares, 2018).

O processo Kraft apresenta um ciclo fechado de aproveitamento residual com a capacidade de ter alta eficiência energética e mínimas perdas químicas, em sua maioria incorporada aos rejeitos durante o processo, com 96% a 97% dos reagentes químicos sendo recuperados. Uma indústria moderna de celulose é capaz de gerar sua própria energia, a partir da madeira dissolvida no licor branco (licor resultante da caustificação), já que a dissolução da separação das fibras pode ser convertida em biocombustível (Foelkel, 2007).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada na indústria com a finalidade de identificar processos ou melhorias que ocasionam significativos impactos ambientais negativos ou positivos. Mesmo para aqueles produtos os quais os danos ambientais são relativamente baixos, a ACV tem o papel de ajudar a identificar as etapas dos processos de produção com potencial poluição associada, assim como aqueles que mostram grande demanda de materiais ou energia contribuindo em melhorias no processo produtivo como um todo.

No presente estudo, os limites do sistema incluíram as seguintes áreas da polpação Kraft com seus respectivos estágios: Linha de fibras (pátio de madeira, cozimento, deslignificação, depuração e lavagem, branqueamento, secagem e enfardamento); Recuperação química (evaporação, caldeira de recuperação e caustificação/forno de cal); Utilidades (caldeira de biomassa, turbo gerador, estação de tratamento de água - ETA, estação de tratamento de

efluente - ETE e estação de tratamento de resíduos, estação de tratamento de água para caldeira - ETAC). Todas as entradas e saídas das etapas do processo foram inseridas no software Simapro, utilizando o método ReCiPe midpoint.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise do ciclo de vida do processo Kraft para obtenção de celulose BEKP, com ênfase na minimização do uso de recursos naturais ao longo da linha de fibras no contexto da operação industrial da Companhia Suzano Papel e Celulose na unidade de Três Lagoas/MS. Este estudo se propõe a conciliar os objetivos de sustentabilidade da empresa, contribuindo para a avaliação holística dos impactos ambientais, econômicos e sociais associados à produção de celulose BEKP.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar de forma detalhada o consumo de recursos naturais, tais como água, madeira, energia e produtos químicos, ao longo do processo industrial da linha de fibras, recuperação química e utilidades, com o intuito de quantificar e identificar áreas de maior impacto ambiental;
- Identificar oportunidades e estratégias para a minimização do uso de recursos naturais e a redução dos impactos ambientais associados ao processo, alinhando-as com as metas de sustentabilidade da Companhia Suzano Papel e Celulose.

### 3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Na conjuntura atual, de acordo com a base de dados de 2022 do Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ), o Brasil ocupa uma posição de destaque como o principal exportador de celulose em nível global. Isso demonstra a relevância do país na produção e comércio desse importante produto florestal. A Tabela 1 mostra que o Brasil exportou 15,6 milhões de toneladas de celulose de fibra curta, com um baixo custo de produção, tornando um dos principais produtores devido aos cultivos de eucalipto ter um ciclo de produtividade de cinco a sete anos, menor em relação a outros países.

Tabela 1 - Ranking dos dez maiores exportadores mundial em celulose 2020.

<b>País</b>	<b>Produção (10<sup>6</sup> t)</b>	<b>% da produção</b>
Brasil	15,6	22,8
Canadá	9,0	13,2
Estados Unidos	7,8	11,5
Indonésia	5,4	7,9
Chile	4,7	6,9
Finlândia	4,3	6,4
Suécia	4,3	6,4
Uruguai	2,6	3,8
Rússia	2,4	3,6
Portugal	1,3	2,0

Fonte: IBÁ (2021).

As empresas atualmente investem em tecnologia de ponta desde as escolhas das mudas de eucaliptos até a produção final da celulose para alcançar os padrões de qualidade de exportação, atendendo o mercado interno e externo, com um produto competitivo no mercado de celulose BEKP.



No mercado atual as empresas vêm aderindo ao sistema *stakeholder* – ferramenta na qual a empresa organiza seus objetivos de rentabilidade e crescimento incluindo programa de participação de membros (gestores, colaboradores, sociedade e outros) para melhoramento do sistema operacional em toda cadeia produtiva contribuindo para redução dos recursos naturais renováveis (água/madeira e outros) e recursos não renováveis (químicos, derivados do petróleo e outros). Na produção de celulose, as empresas buscam atender a legislação ambiental que regem as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT NBR ISO14790:2014 e ABNT NBR ISO14001:2023 no qual engloba o ciclo de vida em sua cadeia produtiva, procurando minimizar os impactos ambientais na manufatura da celulose, para atender o mercado interno e externo com produtos ecologicamente corretos.

Panameño *et al.* (2019) enfatizam a Análise do Ciclo de Vida (ACV) como uma ferramenta crucial no contexto das iniciativas de produção mais limpa em empresas. A ACV desempenha um papel fundamental ao fornecer uma estrutura sólida para avaliar os impactos ambientais de produtos ou processos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte. Essa abordagem não apenas possibilita a identificação de áreas críticas de intervenção e otimização, mas também desempenha um papel vital no desenvolvimento de metodologias e indicadores de avaliação específicos. A criação de indicadores de ACV personalizados é de extrema importância, uma vez que essas métricas específicas podem fornecer informações direcionadas e quantitativas sobre o desempenho ambiental de um produto ou processo.

Esses indicadores personalizados têm um impacto significativo na tomada de decisão dentro das empresas, fornecendo informações claras sobre onde os esforços de melhoria podem ser direcionados de maneira mais eficaz. Além disso, a ACV ajuda as empresas a cumprirem metas de sustentabilidade, reduzir o uso de recursos naturais, minimizar resíduos e emissões e, em última instância, promover práticas de produção mais responsáveis (Panameño *et al.*, 2019).

Portanto, a ACV não é apenas uma ferramenta de avaliação de impacto ambiental, mas também uma aliada estratégica nas iniciativas de produção mais limpa, impulsionando a melhoria contínua e a tomada de decisão informada em prol de práticas empresariais mais sustentáveis e ambientalmente conscientes.

### **3.2 Papel e celulose no estado do Mato Grosso de Sul**

O desenvolvimento das indústrias de celulose no estado de Mato Grosso do Sul começou no início do ano 1970 com incentivo do Plano Nacional de Desenvolvimento (PND), Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para monocultura do eucalipto no estado (Kudlavicz, 2011). No ano de 2010 foi criada pelo governo do Mato Grosso do Sul o PROFLORESTA (Plano Estadual de Desenvolvimento Sustentável de Florestas do Estado de Mato Grosso do Sul) com objetivo de criar estratégia para melhora no setor da cadeia de silvicultura no estado. A expansão da região leste do estado, que engloba o município de Três Lagoas, possui características climáticas e hidrográficas que favorecem a implementação das indústrias de celulose na região. As primeiras empresas a instalar plantas fabris na região foram inauguradas em 2009. A fábrica da Fibria, iniciou como um projeto da antiga Votorantim Celulose e Papel (VCP), entrou em operação com capacidade para produzir 1,3 milhões de toneladas de celulose por ano. Posteriormente, a Internacional Paper/Sylvamo teve sua planta operacional anexada a Fibria para a produção de papel para impressão. Em 2012 o grupo JBS inaugurou a empresa Eldorado do Brasil com uma estimativa de produzir 1,7 milhões de tonelada de celulose ao ano. No ano de 2017 entra em operação a unidade dois da Fibria. Em 2018 a junção da Fibria com a Companhia Suzano Papel e Celulose trouxe ao município de Três Lagoas o título de Capital Nacional da Celulose.

Segundo a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação (Secretaria Estadual de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Informação - SEMADESC, 2023), com o projeto Cerrado da Companhia Suzano Papel e Celulose entrando em operação na cidade de Ribas do Rio Pardo - MS em 2024 e o projeto Sucuriú da empresa chilena Arauco na cidade de Inocência - MS programado para entrar em operação em 2028, elevará o estado de Mato Grosso do Sul como um dos maiores produtores de celulose BEKP.

### **3.3 A cadeia produtiva da celulose**

No Brasil as indústrias do setor de celulose, tem se destacado com investimentos em áreas de plantios, manutenção de áreas degradadas para plantios, biogeração elétrica, assim como tecnologia nas áreas industriais e florestal para o desenvolvimento de produtos que atendam as demandas de mercados (Waltz *et al.*, 2019).

Na cadeia produtiva da celulose estão compreendidos dois segmentos distintos: o processo

florestal e o processo industrial voltado à obtenção da celulose.

No processo florestal, englobam-se diversas áreas, incluindo a silvicultura (florestas plantadas), que abrange desde o sequenciamento genético e a melhoria das mudas de eucalipto para o plantio, até o manejo do solo, a colheita e o transporte das toras por meio de carretas até a área fabril. O gênero *Eucalyptus* é amplamente cultivado devido às suas propriedades vantajosas para a produção de celulose. De acordo com Vieira (2021), o crescimento e processamento de várias espécies de *Eucalyptus* fortalecem significativamente a indústria global de celulose e papel.

O processo industrial compreende a linha de fibras, onde os cavacos são transformados em fibras de celulose, assim como a recuperação química, que objetiva principalmente recuperar os produtos químicos utilizados no processo de cozimento para sua reutilização.

A celulose é um polímero de cadeia linear que possui uma estrutura parcialmente cristalina e organizada constituída de  $\beta$ -D anidro glicopiranos unidas por ligações éter do tipo (1-4). A celulose, o principal constituinte da madeira, representa entre 40% a 47% de sua composição e está sempre associada a outros componentes, tais como a lignina, a hemicelulose e os extrativos (Foelkel, 2007).

Após passar pelo processo Kraft, a madeira é transformada em celulose BEKP, o produto final, destinado a atender à demanda de exportação, bem como ao mercado de papel e outros segmentos. Vários estágios do processo Kraft requerem atenção no que diz respeito ao reaproveitamento de recursos ambientais, com o intuito de minimizar os custos operacionais e reduzir o impacto no meio ambiente.

### **3.3 Processo de polpação Kraft**

#### **3.3.1 Linha de fibras**

A linha de fibras tem como finalidade produzir celulose a partir da madeira em polpa de celulose branca como principal componente do processo e de maior interesse comercial. No processo industrial além da celulose temos a lignina, a hemicelulose e os extrativos vegetais como produtos secundários utilizados pela própria indústria ou reutilizados em outros setores produtivos das companhias.

### 3.3.1.1 Preparação da madeira e pilha de cavacos

A área de preparação da madeira contém as primeiras etapas da linha de fibras do processo Kraft. As toras de madeira advindas das plantações de eucalipto são descascadas quando necessário no começo desta etapa. Após o descascamento a madeira é lavada, picada e os cavacos são peneirados para seleção de cavacos com dimensões ideais, comumente de 2,5 mm de espessura, 8 mm de largura e 25 mm de comprimento. A importância desta seleção é proporcionar posteriormente no digestor uma impregnação pelo licor de cozimento nos cavacos de forma uniforme, gerando menos rejeitos e maior rendimento (Veras Filho, 2018).

Os resíduos sólidos (casca e cavacos fora dos padrões) são reaproveitados na caldeira de biomassa para fornecer vapor a outras partes do processo. Os resíduos líquidos provenientes da lavagem das toras, juntamente com aqueles utilizados no pátio de madeira são tratados na estação de tratamento de efluentes (ETE) e, posteriormente, podem retornar ao processo.

### 3.3.1.2 Digestor

Na etapa do digestor ocorre o início da polpação Kraft, processo que transforma os cavacos de madeira em fibras individualizadas através da extração química da lignina e extrativos, preservando os hidrocarbonetos (celulose e hemicelulose). Atualmente no Brasil, o modelo de digestor tipo contínuo mais empregado no cozimento da madeira a partir do eucalipto utiliza a tecnologia *Lo-Solids*, onde os extrativos e a lignina dissolvida na primeira zona de cozimento são extraídos, resfriados e enviados para a etapa de evaporação, sendo repostos por uma solução de licor de lavagem fraca com licor branco concentrado (LBC) para manter o balanço hidráulico e a carga alcalina para a continuação do cozimento (De Almeida *et al.*, 2018).

Os cavacos de madeira são impregnados através de penetração e difusão com licor branco concentrado também conhecido como licor de cozimento (mistura de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio) ocorrendo em três fases:

Fase inicial: nesta etapa cerca de 50% a 60% do licor de cozimento é consumido, pois é onde ocorre a reação com os extrativos, dissolvendo as cadeias da lignina entre 15% e 25%, a impregnação ocorre por meio de difusão a uma temperatura de 140 °C.

Fase principal: cerca de 70% da lignina é dissolvida e removida, isto ocorre por meio de uma hidrólise alcalina em uma faixa de temperatura entre 130 e 150 °C, (Santos, 2007).

Fase residual: aumenta a degradação dos carboidratos, porém a deslignificação é mais

lenta, dissolvendo aproximadamente 3% da lignina (Carreiro, 2009).

No processo de cozimento, as principais variáveis englobam o número Kappa, a viscosidade, a carga alcalina, a sulfidez, o fator de diluição, o fator H e o rendimento.

O número Kappa é uma medida que avalia a quantidade residual de lignina presente na fibra celulósica. Ele é definido como o número de milímetros de solução de permanganato de potássio a 0,1N que podem ser absorvidos por 10 gramas de polpa completamente seca. Os resultados são ajustados para um consumo de 50% de permanganato adicionado (Tappi, 2000).

A viscosidade é uma medida do grau de degradação das fibras celulósicas, particularmente da camada S2. A parede celular de uma fibra de madeira é constituída basicamente por 2 paredes, a parede primaria e a secundaria. A parede secundaria é formada por 3 camadas denominadas: S1 externa, S2 média e S3 interna. Essas camadas apresentam diferentes disposições das microfibrilas sendo que a camada S2 representa cerca de 74% do volume total da parede celular. Fibras danificadas ou degradadas devido ao excesso de cozimento ou branqueamento tendem a ter dimensões menores, ou seja, cadeias mais curtas (Pedrazzi *et al.*, 2010). A viscosidade pode ser expressa em unidades como Poise (p) ou sua fração centesimal, o Centipoise (cp), bem como em decímetros cúbicos por quilograma ( $\text{dm}^3/\text{kg}$ ).

A carga alcalina se refere à quantidade de produtos químicos, expressos como NaOH e Na<sub>2</sub>S, em relação à quantidade de madeira. A taxa de adição destes produtos químicos pode variar significativamente de uma fábrica para outra. Normalmente, essa taxa é expressa como uma porcentagem de álcali efetivo (AE) em relação a quantidade de madeira.

A sulfidez é uma medida da quantidade de Na<sub>2</sub>S presente no licor de cozimento em relação à quantidade de NaOH. A presença de sulfeto acelera o processo de deslignificação, o que possibilita obtenção de polpas com fibras mais resistentes para um mesmo grau de deslignificação (Lombardi; Luiz, 2017).

O fator de diluição representa a relação entre a quantidade de licor fraco frio aplicada em excesso e a quantidade de licor que acompanha a polpa. O fator de diluição é expresso em termos de toneladas de licor negro frio fraco por tonelada de polpa seca ao ar (Gullichsem; Paulapuro; Fogelholm, 2000).

O fator H é uma variável que se baseia na área sob a curva da velocidade relativa da reação em relação ao tempo, expresso em horas. Essa abordagem permite que qualquer ciclo de

cozimento seja representado por um único valor. No contexto do sistema *Lo- solids*, que utiliza temperaturas de cozimento relativamente baixas, o fator H se torna uma variável de extrema importância. Isso ocorre porque, dada a influência da taxa de produção na determinação do tempo de cozimento, o fator H permanece constante mesmo com variações nas temperaturas (Daniel *et al.*, 2003; Simão *et al.*, 2005).

O rendimento é um indicador que avalia a eficiência do processo de cozimento em relação à perda de material celulósico. Ele é expresso como uma porcentagem, relacionando o peso da polpa seca ao peso dos cavacos secos.

### 3.3.1.3 Deslignificação por O<sub>2</sub>

De acordo com Venson (2008), a deslignificação por oxigênio tem como objetivo alvejar a polpa e degradar ou dissolver fragmentos de lignina residual presentes na polpa após o processo de cozimento. Essa etapa pode ser vista como uma extensão do processo de cozimento, resultando em uma redução significativa do número Kappa da polpa. Os químicos utilizados nesse processo incluem soda (NaOH), licor branco oxidado e oxigênio.

Os produtos químicos ativos no processo de deslignificação por oxigênio são o oxigênio gasoso (O<sub>2</sub>) e soda cáustica (NaOH). O licor branco oxidado é a principal fonte de álcali, este licor é oxidado para diminuir a sua sulfurosidade, a qual causa deterioração na resistência da fibra. Na deslignificação, o sulfeto de sódio reduz a qualidade da polpa e deve ser oxidado para outros compostos. O sulfeto no licor branco, durante a oxidação, é convertido em tiosulfato.

Como produto químico, o oxigênio é um oxidante fraco, não reagindo com todas as estruturas da lignina. Entretanto, a reação oxidante da lignina promove a fragmentação das ligações da cadeia lateral da lignina e os produtos gerados pela reação dissolvem-se em álcali. Além da dissolução da lignina, ocorrem reações laterais nocivas à deslignificação com oxigênio, em que o oxigênio reage com os carboidratos da madeira. Estas reações levam à degradação das cadeias de celulose, trazendo degradação da viscosidade e da resistência da polpa (Souza *et al.*, 2018).

Ainda de acordo com Souza *et al.* (2018), o oxigênio também reage com os extrativos reduzindo seu teor no produto acabado. Este processo ocorre devido à baixa reatividade do oxigênio e nesta etapa do processo ocorre redução de 40% a 60% no número Kappa.

#### **3.3.1.4 Depuração e lavagem**

Após a deslignificação por oxigênio a polpa é lavada com a finalidade de remover o licor negro. Há vários tipos de lavadores, dentre eles o vácuo contra-corrente, por difusão, pressão rotativa, filtros com correia horizontais ou lavadores químicos. O licor negro resultante deste processo sofre diluição em água de lavagem e, conseqüentemente, chama-se licor negro fraco. No estágio de depuração, há a remoção de resíduos (nós e palitos) prejudiciais a qualidade da polpa e que precisam ser removidos para garantir qualidade quanto as propriedades físicas e químicas (Figueirêdo *et al.*, 2012).

#### **3.3.1.5 Branqueamento**

O estágio de branqueamento pode ser definido como um tratamento físico-químico que tem por objetivo melhorar as propriedades da pasta celulósica, principalmente a alvura, que expressa o quanto branco a celulose se apresenta. A alvura é determinada na refletância apenas de radiação nos comprimentos de onda próximos à 457nm na faixa do espectro azul (Jordan, 1996).

A depender da destinação de mercado da polpa celulósica, o tipo de sequência de branqueamento é projetado para a fábrica, podendo obter uma polpa com baixa alvura e maior rendimento ou uma polpa com uma alvura elevada e menor rendimento.

Em consequência do grande impacto ambiental causado pelos efluentes gerados nesta etapa, muitas indústrias não utilizam o cloro elementar, este processo é denominado ECF (*elementary chlorine free*), tendo como substituto o dióxido de cloro com o objetivo de minimizar a presença de compostos organoclorados de alta toxicidade nos efluentes (Ventorim *et al.*, 2009).

#### **3.3.1.6 Secagem**

Neste estágio a polpa celulósica advinda do branqueamento é depurada para remoção de impurezas, após passar pelo processo de depuração a polpa é enviada para uma mesa desaguadora, onde a maior porcentagem de água é retirada, dando formação a folha que seguirá para o processo de secagem a base de vapor (Zeber; Jardim, 2015).

### **3.3.1.7 Enfardamento**

Por fim, as folhas de celulose são empilhadas, embaladas e carregadas em caminhões para o transporte. Em algumas fábricas brasileiras, o transporte é feito através do mar de uma cidade para o porto principal do Brasil e em outros casos os caminhões levam até o destino visando o mercado interno ou exportação mundial.

### **3.3.2 Recuperação química e utilidades**

A etapa de recuperação química tem o objetivo de viabilizar economicamente e ambientalmente o processo Kraft, onde é processado o licor extraído do digestor, recuperando os químicos e formando um novo licor de cozimento (Melo *et al.*, 2010).

Nas unidades fabris compreende-se como recuperação química os seguintes estágios: Evaporação de múltiplos estágios; Caldeira de Recuperação Química; Caustificação; Forno de cal. Por sua vez, a utilidades compreendem os estágios: Caldeira de biomassa; Turbo geradores (geração e distribuição de energia elétrica); Estação de tratamento de água (ETA); Estação de tratamento de água para caldeira (ETAC); Estação de tratamento de efluentes (ETE).

#### **3.3.2.1 Evaporação de múltiplos estágios**

A evaporação de múltiplos estágios compreende um conjunto de trocadores de calor de contado indireto (placas ou tubos), onde ocorre o princípio da evaporação e condensação da água do licor negro através da diminuição da pressão nos evaporadores posteriores. Nesta etapa há a produção do licor negro concentrado, através da elevação da concentração de sólidos de 10% a 20% para 65% a 80% e como consequência, material condensado para reutilizar no processo fabril (Melo *et al.*, 2010).

#### **3.3.2.2 Caldeira de recuperação química**

O licor negro concentrado, possui um poder calorífico de 2500 a 3500 kcal/kg e cerca de 35% deste licor concentrado é de material inorgânico e cerca de 25% é de água. As três principais funções da caldeira de recuperação são:

- Produção de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ );
- Gerar vapor através da combustão do licor preto;



- Consumir a matéria orgânica dissolvida na madeira, eliminando assim uma descarga adversa para o meio ambiente.

O carbonato de sódio e o sulfeto de sódio que sobram após a queima do licor concentrado são enviados para a etapa de caustificação em forma de licor verde, o vapor gerado é enviado para mover as turbinas que transformam energia mecânica em energia elétrica (Hupa, 2007).

### **3.3.2.3 Caustificação**

De acordo com Figueirêdo (2009), é através do processo de caustificação que se recupera o último produto químico do cozimento da madeira, ou seja, o hidróxido de sódio (soda). Um dos fatores que influem na viabilidade econômica do processo de fabricação Kraft é sua capacidade de regeneração dos reagentes químicos do cozimento.

No ciclo de recuperação química, a operação de caustificação, desempenha um importante papel, no qual o licor verde obtido por dissolução dos fundidos na caldeira de recuperação se transforma no licor branco, com concentração e qualidade adequada para o cozimento.

O licor verde proveniente do tanque de dissolução dos fundidos contém impurezas que devem ser retiradas, portanto, o licor deve ser clarificado ou filtrado. Em seguida, o licor clarificado reage com uma suspensão concentrada de hidróxido de cálcio, onde o carbonato de sódio é convertido em hidróxido de sódio produzindo o licor branco.

O cálcio que precipita na forma de carbonato de cálcio é denominado lama de cal. Quando precipita, a lama arrasta consigo licor branco e a mesma deve ser lavada para recuperar o licor branco.

A lama de cal lavada é engrossada em filtros e conduzida ao processo de calcinação onde regenera o óxido de cálcio que retorna ao apagador onde formará novamente a suspensão de hidróxido de cálcio que reagirá novamente com o licor verde.

O processo de caustificação não mudou significativamente nos últimos 70 anos. No entanto, muitas melhorias em termo de equipamentos e controle de processo têm ocorrido nas duas últimas décadas.

### **3.3.2.4 Forno de cal**

Durante muito tempo, o forno de cal rotativo tem sido o método principal de calcinar os lodos de carbonato de cálcio na indústria de polpação Kraft. O primeiro forno de cal surgiu na Suécia em 1905, porém os maiores desenvolvimentos ocorreram na América depois de 1935 e na Europa depois de 1950. Estes fornos operam seguindo os mesmos princípios que os fornos rotativos de cimento e incluem correntes de aço para recuperação de calor. Os primeiros fornos possuíam dois suportes e eram relativamente pequenos (1,8 a 2,4 m de diâmetro e de 30 a 40 m de comprimento), não tinham correntes e a alimentação era para um teor de sólidos de 40%. Atualmente o forno de cal rotativo apresenta dimensões de 1,8 a 4,0 m e 30 a 110 m para diâmetro e comprimento, respectivamente (Figueirêdo, 2012).

O forno de cal é dividido em quatro zonas funcionais ao longo de seu comprimento que representam estágios de conversão da lama de cal, sendo elas: secagem da lama (zona de secagem); aquecimento da lama através de levantadores (zona de aquecimento); calcinação efetiva entre 815 e 1150°C (zona de calcinação) e resfriamento da cal (zona de resfriamento).

Caldeira de biomassa

A caldeira de biomassa é um equipamento com função de gerar vapor a partir da queima da biomassa. O vapor gerado é utilizado no processo e/ou no turbo gerador onde a energia do vapor será transformada em energia elétrica. Nas fábricas de celulose ela serve como fonte auxiliar de vapor e energia da fábrica. Além de queimar biomassa também incinera os rejeitos da fábrica, tais como, gases não-condensáveis, metanol, lodo da ETE, dentre outros (Foelkel, 2016).

Em uma caldeira LFB (Leito Fluidizado Borbulhante), o combustível é introduzido em um leito denso de areia, o qual é mantido fluidizado pela vazão do gás de fluidização, que consiste em uma mistura de ar primário com gás de recirculação. A combustão é completada na parte superior com a ajuda do ar secundário e terciário. O calor liberado é absorvido pelo sistema de água e vapor, sendo o vapor enviado para a turbina e outras etapas do processo (Cana Online, 2018).

As principais vantagens desse tipo de caldeira são: flexibilidade de combustível, alta disponibilidade, alta eficiência, sensibilidade às mudanças de carga, baixos custos de operação, baixas emissões, controle de processos e apropriada para *retrofits*.

### **3.3.2.5 Turbo geradores (geração e distribuição de energia elétrica)**

As turbinas têm o objetivo de transformar a energia termomecânica do vapor em trabalho

que posteriormente é convertido em energia elétrica no gerador. O vapor saturado vindo das caldeiras de recuperação e de biomassa, são aquecidos transformando-os em vapor superaquecido. O uso de vapor superaquecido em turbinas é decorrente das elevadas velocidades do vapor que são encontradas nestes dispositivos. Se fosse usado o vapor saturado, qualquer gotícula de água que se formaria na tubulação provocaria um forte processo de abrasão na turbina (Oliveira, 2015).

### 3.3.2.6 Estação de tratamento de água (ETA)

A água de superfície da região é captada e recebe um tratamento convencional, visto que carregam consigo grande quantidade de substâncias que devem ser removidas de acordo com a necessidade de aplicação (Bajpai, 2017). Constituintes encontrados na água: sais dissolvidos inorgânicos e orgânicos; matéria orgânica em suspensão; material coloidal; gases dissolvidos e microorganismos.

A função de cada etapa no processo de tratamento de água é essencial para garantir a qualidade e a segurança da água fornecida. A primeira etapa, conhecida como captação, tem como objetivo a coleta da água e o ajuste do seu pH para uma faixa ideal de 7,0 a 8,0. Isso é feito para otimizar a eficácia das etapas subsequentes, como coagulação e cloração.

A coagulação é uma operação crucial que visa transformar as substâncias presentes na água, principalmente as partículas em forma de suspensão fina e suspensão coloidal, em partículas maiores, chamadas de flocos. Este processo é essencial para que essas partículas possam ser facilmente removidas durante a decantação e a filtração. O mecanismo principal por trás da coagulação é a desestabilização coloidal, onde coloides presentes na água são modificados por coagulantes, substâncias que neutralizam as cargas elétricas desses coloides. Isso resulta em uma mudança na interação entre os coloides e a água, facilitando a formação de flocos. Os coagulantes utilizados incluem o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico e coagulantes orgânicos catiônicos (Howe *et al.*, 2016; Pavanelli, 2001).

Na etapa de floculação, as partículas coloidais desestabilizadas após a coagulação são colocadas em contato umas com as outras, promovendo o aumento do seu tamanho. Isso resulta na formação de flocos maiores, que é alcançada por meio de colisões e agregações de partículas. Para garantir a formação eficaz dos flocos, é necessário o uso de agentes floculantes. A dosagem adequada de coagulantes, influenciada pelo pH e outros fatores, é fundamental para evitar dosagens insuficientes ou excessivas, que podem prejudicar o processo (Howe *et al.*, 2016).

A decantação é a etapa em que os sólidos em suspensão na água sedimentam devido à ação da gravidade. Quanto melhor for a decantação, mais eficiente será a filtração. A sedimentação pode ocorrer de diferentes formas, dependendo da concentração de sólidos em suspensão. Em suspensões diluídas, as partículas sedimentam individualmente, seguindo a lei de Stokes. À medida que a concentração de sólidos aumenta, a sedimentação floculenta se torna predominante, com partículas próximas umas das outras e colisões frequentes. Além disso, pode ocorrer sedimentação zonal, onde a concentração volumétrica das partículas aumenta substancialmente. A sedimentação por compressão envolve o peso das partículas sobrepostas, resultando na compactação e redução do volume. No tratamento de água para abastecimento industrial, a sedimentação floculenta é a mais comum.

A etapa final, a filtração, envolve a passagem da água decantada por um meio filtrante, como areia, seixos rolados, antracito, carvão ativo, cartuchos ou granada, com o objetivo de remover impurezas. Os filtros podem ser classificados como lentos ou

rápidos, dependendo da área superficial e da vazão de alimentação. A capacidade de filtração dos meios filtrantes não é constante, o que requer a realização de lavagens para manter sua eficiência. O processo de lavagem envolve a passagem de água limpa no sentido inverso de operação do filtro, sendo reciclado no tratamento para minimizar os impactos ambientais (Viana, 2013).

### **3.3.2.7 Estação de tratamento de água para caldeiras (ETAC)**

A estação de tratamento de águas para ser utilizada na caldeira tem o objetivo de remover os sais dissolvidos na água. O processo de tratamento da água abrange várias etapas, cada uma com uma função específica. Inicialmente, os filtros de areia abrangem o pré-tratamento, removendo as impurezas de maior tamanho da água. Em seguida, os filtros de carvão utilizam carvão ativado para adsorver substâncias indesejadas, contribuindo para a purificação da água.

Os Filtros Cartuchos também atuam na fase de pré-tratamento, preparando a água para as próximas etapas do processo (Claudino, 2003).

A etapa da osmose reversa é central no tratamento, onde a aplicação de pressão externa força a passagem da água por uma membrana semipermeável na direção oposta, resultando em uma concentração maior de íons dissolvidos e sólidos suspensos na água. Os leitos mistos realizam a troca iônica, removendo cátions e ânions carregados.. O tanque de água desmineralizada é responsável por armazenar a água de alta qualidade produzida pelos leitos

mistos (Moraes, 2021).

Por fim, o desaerador elimina os gases dissolvidos na água de alimentação das caldeiras. Esta etapa controla a corrosão no interior das caldeiras, melhorando a eficiência e a segurança do sistema de vapor. Cada etapa da ETAC contribui para garantir a remoção de impurezas e a obtenção de água de alta qualidade para diversos fins industriais (Macêdo, 2018).

### **3.3.2.8 Estação de tratamento de efluentes (ETE)**

Os sistemas convencionais para tratamento de efluentes utilizados pela maioria das indústrias de papel e celulose possuem etapas preliminares, primárias e secundárias. Se o efluente não atingir os padrões de lançamento, é acrescentado o tratamento terciário (Thompson *et al.*, 2001; Ince; Cetecioglu; Ince, 2011).

O objetivo do tratamento primário é remover os sólidos suspensos, como partículas, materiais orgânicos e fibras de casca de madeira. Normalmente, o tratamento secundário se constitui de lodos ativados e lagoas aeróbias, que buscam a remoção DBO<sub>5</sub>, sólidos suspensos, AOX e DQO. O tratamento terciário destina-se à remoção da turbidez, cor residual, compostos orgânicos, fósforo e nitrogênio, bem como a desinfecção do efluente. A coagulação/floculação/precipitação, ozonização, biofiltração, membranas, osmose reversa, entre outros, são exemplos de técnicas utilizadas nesta etapa (Araújo, 2013).

Grande parte das estações de tratamentos de efluentes em países em fase de desenvolvimento, como o Brasil, mantém-se no nível secundário quanto às etapas de tratamento e desta maneira, há a possibilidade do efluente lançado conter compostos poluentes que facilitam a ocorrência de degradação dos corpos receptores.

Uma grande parcela das indústrias de papel e celulose fazem uso de processos biológicos no tratamento de suas águas residuais. Isto se justifica pelo fato destes processos terem custos baixos e facilidade operacional (Hermosilla *et al.*, 2015).

Estes processos contemplam, geralmente, lodos ativados e lagoas aeradas, mostrando-se eficientes para a remoção da matéria orgânica biodegradável, por outro lado, podem ser inconvenientes por serem suscetíveis à composição do efluente, necessitando de um controle rígido de nutrientes, microrganismos e pH, além de produzirem um volume considerável de lodo (Kunz *et al.*, 2002).

Inerentes aos processos biológicos, são relevantes os vários estudos que asseguram a

redução de alguns compostos tóxicos aos corpos hídricos quando combinados e utilizados em processos avançados. É enfatizado por Ashrafi et al. (2015) que, por aumentarem de forma considerável a qualidade final do efluente, os sistemas integrados começam a ter maior relevância.

Outra opção de tratamento de efluentes industriais são aqueles baseados em processos químicos - potencialmente aplicáveis a sistemas ambientais, como tratamento de efluentes industriais, desinfecção e purificação de água.

A capacidade de promover a degradação, podendo ser utilizado até para a mineralização da matéria poluente refratária, justifica tal proposta de uso, associados aos processos biológicos, podem ser utilizadas a combinação de diferentes técnicas. A aplicação de alguns métodos de sedimentação e flotação, filtração, osmose reversa, coagulação e precipitação, ozonização, adsorção, entre outros processos de oxidação avançados para águas residuárias é estudada por Kamali e Khodoparast (2015).

### **3.4 Geração de resíduos no processo de polpação Kraft**

#### **3.4.1 Resíduos líquidos**

Na unidade fabril o processo de gerenciamento de resíduos líquidos pode ser dividido em três partes principais: gerenciamento de matéria; linha de polpação com sistema de recuperação química e energética e sistema externo de tratamento de efluentes.

Aproximadamente 85% do volume total do efluente é proveniente da etapa de branqueamento. Sendo assim, esta parte fabril é amplamente estudada com a finalidade de minimizar as cargas orgânicas do efluente, principalmente as cargas de organoclorados, sem prejudicar o rendimento e a alvura da produção celulósica.

As cargas e características do efluente deste tipo de indústria depende de fatores como: grau de deslignificação da celulose não branqueada, o processo de branqueamento utilizado, tipo de madeira, alvura final desejada, consumo de produtos químicos e água (Munkittrick *et al.*, 1997; Dahl, 2008). Um importante parâmetro para o controle do efluente é o número Kappa. Quanto maior o número Kappa, diretamente maior o teor de lignina. Em casos de baixa quantidade de lignina a ser removida durante o branqueamento, o consumo de produtos químicos também diminui e conseqüentemente a carga para o efluente é minimizada.

### **3.4.2 Resíduos gasosos**

Na etapa do processo de cozimento, deslignificação e depuração, devido à presença de íons sulfeto como reagente ativo no licor de cozimento, ocorre a formação de gases odoríferos, como o metilmercaptana ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ), dimetildisulfeto ( $\text{CH}_3\text{S}_2\text{CH}_3$ ), dimetilsulfeto ( $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ) e o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que apesar da geração em pequenas quantidades causam um odor desagradável, característico do processo de polpação Kraft. Nas fábricas modernas, estes gases são succionados para lavadores de gases, onde são lavados, sendo as partículas sólidas removidas e enviadas de volta para o processo e os gases são enviados para queima na caldeira (Mieli, 2007).

### **3.4.3 Resíduos sólidos**

Os resíduos sólidos são gerados durante o processo e destinados para compostagem e posterior uso como corretivo de solo, reaproveitamento no próprio processo ou queima na caldeira de biomassa para geração de energia.

#### **3.4.3.1 Biomassa de eucalipto**

A biomassa de eucalipto é composta basicamente de folhas, cascas e galhos, que são transportados junto com as toras de eucalipto para a fábrica. Antes da picagem das toras, há a separação desta biomassa e este material posteriormente é enviados junto com os cavacos finos superdimensionados gerados no peneiramento dos cavacos, para queima na caldeira de biomassa (Foelkel, 2007).

#### **3.4.3.2 Dregs e grits**

Os dregs e os grits são resíduos gerados e removidos em diferentes etapas da caustificação, no entanto, apresentam características químicas semelhantes e são misturados para um único tratamento final. O grits são impurezas geradas da cal que não reagiu e os dregs são compostos por elementos insolúveis da biomassa removidos no processo de clarificação do licor verde através de um filtro (Foelkel, 2011).

Segundo a ABNT NBR 10004:2004 – RESÍDUOS SÓLIDOS – para classificação deste resíduo, deve ser feito análises de composição do mesmo, em função aos insumos utilizados no

processo (ABNT, 2004).

#### **3.4.3.3 Lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE)**

Todos os efluentes líquidos da fábrica são encaminhados para tratamento na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), onde são homogeneizados e tratados. Estes efluentes são compostos pelas águas oriundas da lavagem das toras, branqueamento da fibra de celulose, máquina de secagem e da área administrativa. Devido ao grande volume de compostos biológicos oriundos do processo de extração de celulose, o efluente apresenta uma carga orgânica elevada (Foelkel, 2010).

O tratamento está dividido em duas etapas, sendo que após a homogeneização ocorre a decantação primária para remoção de sólidos sedimentáveis, principalmente fibras. Este efluente segue para o tratamento secundário ou biológico, com lodo ativado, com adição de nutrientes como nitrogênio e fósforo que melhoram a eficiência da redução de carga. O lodo biológico é separado nos decantadores secundários (Bajpai, 2015).

O lodo primário é composto por fibras de celulose, sendo removido do sistema com cerca de 45% de consistência e apresenta uma coloração clara. O lodo biológico é pastoso, homogêneo, de coloração marrom escuro, com odor característico. A consistência esperada para este material varia entre 10% e 15% (Bajpai, 2015).

A classificação destes resíduos é realizada segundo a ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS SÓLIDOS (ABNT, 2004) – Classificação, que prevê ensaios de composição do resíduo em função dos insumos utilizados no processo, tendo em vista que este resíduo tem origem conhecida e não consta nos anexos A e B da referida norma. Este resíduo não apresenta inflamabilidade, corrosividade nem reatividade, mas devido a presença de substâncias listadas no anexo C é realizado um ensaio de lixiviação conforme ABNT NBR 10005:1987 (ABNT, 2004) para avaliar se apresenta toxicidade.

Os metais pesados presentes na massa bruta do lodo da ETE aparecem em concentrações não significativas, sendo que o teste de lixiviação de resíduos confirma o enquadramento do resíduo como não perigoso devido aos valores abaixo do limite do Anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004.

#### **3.4.3.4 Lodo da estação de tratamento de água (ETA)**



O lodo da ETA é o resíduo sólido obtido no processo de tratamento da água bruta por processos de coagulação, floculação, decantação e filtração adicionados de produtos químicos como sulfato de alumínio, utilizados para auxiliar na remoção de sólidos suspensos (Libânio, 2010).

Este lodo é constituído de resíduos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, partículas orgânicas em suspensão, areia, silte, argilas além de minerais como ferro, cálcio, magnésio, manganês e outros, com grande presença de hidróxidos de alumínio utilizado como composto auxiliar na floculação (Richter, 2001).

Sua característica depende da qualidade físico-química da água in natura, da qualidade da água tratada desejada e dos produtos químicos utilizados no seu tratamento. O teor de sólidos varia de 0,1% a 4%, sendo 75% a 90% sólidos suspensos e 20% a 30% de compostos voláteis apresentando, portanto, pequena fração biodegradável, a qual pode ser prontamente oxidável (Botero, 2008).

Os metais pesados presentes na massa bruta do lodo da ETA aparecem em concentrações não significativas, sendo que o teste de lixiviação de resíduos confirma o enquadramento do resíduo como não perigoso devido aos valores abaixo do limite do Anexo F da norma ABNT NBR 10004: 2004.

#### **3.4.3.5 Cinzas da caldeira de biomassa**

As indústrias de celulose, possuem como uma das fontes de geração de energia, uma caldeira de leito fluidizado que tem como combustível biomassa, a partir do aproveitamento de cavacos, serragem, cascas e galhos de eucalipto (Gimenes, 2012).

O resíduo gerado nesta combustão, a cinza de biomassa, pode ser removida pelo fundo da caldeira, denominada cinza pesada ou pelos filtros, denominada cinza leve (Silva *et al.*, 2009). Ambos os materiais recebem classificação segundo a NBR 10.004:2004 de Resíduo Classe IIA - Não Inerte.

Devido a eficiência da caldeira de biomassa na queima do combustível a cinza possui característica predominantemente mineral, com teor de cátions de interesse agrônômico e baixo teor de carbono orgânico (Alves *et al.*, 2017).

### **3.5 Aproveitamento de resíduos do processo Kraft**

Os resíduos gerados no processo são separados em grupos com características semelhantes do ponto de vista de tratamento, composição e destinação final. Seguindo este critério tem-se: lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE) como material orgânico; cinzas da caldeira de biomassa como material mineral; dregs, grits e a lama de cal como material calcário.

A compostagem do lodo da ETE, tanto pelo processo aeróbio como o anaeróbio, apresenta características orgânicas para utilização diretamente como um fertilizante no solo ou na preparação de substratos para plantas de forma isolada ou em mistura com outros componentes (Tsutiya, 2001). Este fertilizante orgânico além de incorporar nutrientes vegetais diretamente no solo, também influencia positivamente nas características físicas e químicas do mesmo (Zibilske; Clapham, 1990).

As substâncias orgânicas aumentam o poder tampão do solo, evitando mudanças bruscas de pH e condutividade, aumentam a capacidade de troca catiônica, permitindo reter e disponibilizar para as plantas uma quantidade maior de nutrientes, além de serem substâncias agregantes capazes de manter uma estrutura estável à ação das chuvas, amenizando efeitos da erosão (Andreoli; Ferreira, 1999). O material orgânico serve de alimento para a micro e meso vida do solo, responsável pela manutenção da bioestrutura e competição com organismos patogênicos, favorecendo sensivelmente a sanidade vegetal (Fernandes; Silva, 2008).

As cinzas de biomassa são enquadradas como materiais minerais, que após combustão eficiente possuem em sua composição minerais de valor fertilizante e corretivo, prontamente disponíveis quando aplicados ao solo (Arruda *et al.*, 2016). Arruda *et al.* (2016) citam que entre estes minerais podem ser relacionados teores consideráveis de potássio, fósforo, cálcio e magnésio que quando incorporados ao solo possuem uma parcela significativa prontamente solubilizada e disponível para absorção pelas raízes das plantas enquanto outra é retida no complexo de troca do solo ou percolada ao longo do seu perfil por ação das precipitações de chuva. Além disso, devido a caracterização fina, as cinzas apresentam uma eficiência relativamente considerável, com uma elevada área de contato com as partículas do solo, o que permite uma rápida reação, elevando sua Capacidade de Troca de Cátions (CTC) (Ribeiro *et al.*, 2015).

Os dregs e grits são excelentes corretivos de acidez de solo, agregando ainda nutrientes em quantidades expressivas. Possui alto Valor de Neutralização (VN), apresentando, porém, um Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) mais baixo que a lama de cal em função do reagrupamento de suas partículas devido a presença de umidade e licor residual o que lhe atribui

baixa eficiência relativa (Waldemar; Herrera, 1986). Sua reatividade no solo é elevada, neutralizando a acidez do solo cerca de 60 dias após sua aplicação. Segundo a literatura, tem apresentado excelentes resultados tanto em áreas de pastagens, fruticultura como em plantas de lavoura.

Ainda de acordo Waldemar e Herrera (1986), como este material tem contato com o licor de cozimento, os teores de sódios do produto devem ser controlados para que não ocorram riscos de dispersão de argilas por ação do sódio sobre a estrutura do solo ou ainda riscos de salinização. Valores desse elemento abaixo de 2% são os desejáveis, no entanto teores de até 5% ainda permitem sua utilização em condições controladas.

A lama de cal, por sua constituição física e química, apresenta grande potencial de uso como corretivo de acidez de solo devido aos altos teores de cálcio na forma de carbonato, conforme evidencia o seu valor de neutralização (Maeda; Gomes; Bognola, 2013). Este resíduo é um calcário calcítico de alto poder de neutralização e pode ser utilizado pelos agricultores para correção dos solos em culturas anuais, bem como em pastagens nativas ou implantadas. Este material não apresenta nenhuma restrição de uso e o monitoramento do mesmo deve se ater a qualidade corretiva de forma a orientar a utilização no solo de acordo com as necessidades de calagem (Guimarães; Floriano; Vieira, 2015).

Sua utilização pode ser feita com os mesmos equipamentos usados na aplicação de calcário agrícola para correção da acidez do solo. Deve-se atentar apenas para o teor de umidade presente no material, particularmente quando armazenado a campo (Bellote *et al.*, 1998). Sua granulometria fina, garante uma alta reatividade no solo, semelhante a alguns calcários filler, com maior concentração de óxido de cálcio e magnésio, o que gera grande demanda por parte de produtores rurais (Simonete *et al.*, 2013).

Os dregs os grits e a lama de cal são resíduos que não apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade nem patogenicidade, mas devido a presença de substâncias listadas no anexo C como metais pesados e seus compostos é realizado um ensaio de lixiviação conforme ABNT NBR 10005:1987 para avaliar se apresenta toxicidade.

### **3.6 Análise do Ciclo de Vida (ACV)**

A ACV é uma importante ferramenta para avaliação dos impactos ambientais na produção de um produto ou na execução de um serviço, ela pode auxiliar na tomada de decisões em medidas que possam reduzir estes impactos (Ross; Evans, 2002). A ACV é regida pela

International Organization for Standardization (ISO).

Para estudar a metodologia da ACV, se faz necessário introduzir alguns outros conceitos, que são definidos na ISO 14040 (1997):

- Ciclo de vida: Engloba todos os estágios de um sistema de produto, desde a obtenção das matérias-primas até a disposição final;
- Aspecto ambiental: É o elemento dos produtos ou serviços que pode interagir com o meio ambiente;
- Unidade funcional: É a unidade de referência utilizada para quantificar o desempenho de um sistema de produto;
- Fluxo elementar: Energia ou material que transita entre o meio ambiente e o sistema estudado sem transformação por interferência humana;
- Sistema de produto: É o conjunto de processos e fluxos elementares que modela o ciclo de vida de um produto;
- Fronteira do sistema: São um conjunto de critérios que especificam quais processos e fluxos elementares serão considerados no sistema de produto.

Por sua vez, o estudo da análise do ciclo de vida é dividido em quatro etapas: definição de objetivo e escopo; análise de inventário de ciclo de vida; avaliação de impactos de ciclo de vida e interpretação de resultados.

### **3.6.1 Definição do escopo**

Para a definição do escopo é fundamental que este forneça subsídios para atingir os objetivos declarados, assegurando a abrangência, profundidade e o detalhamento do estudo. A norma ISO 14040 (1997) especifica os requisitos e provê orientações para a avaliação do ciclo de vida (ACV).

### **3.6.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) e interpretação**

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é considerado a estrutura principal da ACV, onde são levantados os dados e procedimentos de cálculos quantificando as entradas e saídas importantes de um sistema de produção de um produto, relacionando as categorias de impactos.

O ICV então é uma ferramenta analítica que serve para quantificar fluxos ambientais, tais como, emissões no ar, efluentes líquidos, consumo ou falta de energia e resíduos sólidos. Nesta fase deve ser considerado que tudo que entra deve sair do sistema avaliado, desde a extração da matéria prima até o final do produto, em termos de massa ou energia.

Segundo a ISO 14040 (1997), o ICV tem como objetivo coletar dados e quantificar esses dados considerando as entradas e saídas do sistema durante o ciclo de vida de um produto, podendo ser feitos em três etapas que incluem a:

- Coleta de dados: onde é feito o levantamento dos dados em cada processo, respeitando as fronteiras do sistema e estes dados podem ser definidos como dados primários e dados secundários;
- Dados primários: são os dados levantados no local da fabricação do produto ou serviço estudado;
- Dados secundários: são os dados obtidos a partir de um banco de dados ou da literatura. Estes podem ser classificados sob títulos gerais.

A etapa de AICV requer a interpretação dos dados e julgamentos de valor a serem feitos. Os efeitos dos recursos utilizados e das emissões geradas são agrupados e quantificado em um número limitado de categorias de impacto, que podem então ser ponderadas por importância. Uma lista típica de indicadores de impacto global inclui: Alterações climáticas globais; Destruição do ozônio estratosférico; Acidificação; Eutrofização; Toxicidade humana.; Ecotoxicidade.

As categorias de impacto podem ser selecionadas baseadas naquelas disponíveis com o software utilizado. Esses indicadores são ainda divididos por classificação (usados para classificar os dados de carga pelo seu impacto ambiental, como chuva ácida, destruição da camada de ozônio, etc.); caracterização (analisa o impacto da carga classificada a cada categoria) e valorização que permite consolidar o grau de impacto de cada categoria obtido pela análise qualitativa em números simples. Os elementos opcionais de um AICV de acordo com a ISO 14042 (2000) são: normalização, ponderação, agrupamento e análise de qualidade de dados.

A normalização ocorre quando a magnitude dos resultados do indicador de categoria é calculado em relação às informações de referência (por exemplo, a comparação de produtos).

A ponderação ocorre quando os resultados dos indicadores de diferentes categorias de

impacto são convertidos em uma unidade comum usando fatores baseados em escolhas de valor. Neste sentido, o impacto das categorias devem ser atribuídas a um ou mais grupos classificados de acordo com a localização geográfica, relevância, prioridades da empresa etc., então o agrupamento deve ser realizado.

A análise de qualidade de dados ou análise de sensibilidade, determina a adequação do inventário de dados e sua aplicabilidade ao estudo (especialmente quando genérico ou de banco de dados informações são usadas). Em casos industriais, como nas empresas de celulose, os dados normalmente são não genéricos e a verificação de dados é realizada pelo responsável pelo meio ambiente.

Na fase de interpretação dos resultados, é necessário chegar a conclusões e recomendações de acordo com o objetivo definido e escopo do estudo. Os resultados do ICV e AICV são combinados e relatados para fornecer um relato completo e imparcial do estudo. A interpretação do ciclo de vida de uma AICV ou ICV compreende três elementos principais de acordo com a ISO 14043 (2000): Identificação dos problemas significativos com base nos resultados do ICV e AICV, as fases de uma ACV; Avaliação dos resultados, que considera abrangência, sensibilidade e consistência; Conclusões e Recomendações.

Existem tipos de softwares que auxiliam no desenvolvimento de uma análise do ciclo de vida, organizando o fluxo das informações levantadas no inventário do ciclo de vida, auxiliando nas modelagens dos cenários ou nos cálculos dos impactos ambientais.

O software Simapro, desenvolvido pela empresa holandesa Pré Sustainability, reúne as principais bases de dados e métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) disponíveis no mercado e, por isso, é um dos softwares mais utilizados no mundo.

### **3.6.3 Método ReCiPe**

Dentre os métodos para a ACV, o método ReCiPe engloba impactos importantes e possui duas formas de categorias midpoint e endpoint, sendo um dos métodos mais utilizados em estudos de ACV realizados no Brasil. Ele tem origem holandesa e foi desenvolvido pela Pré (*Product Ecology Consultants*). Sua principal característica é converter as emissões de substâncias perigosas e extrações de recursos naturais em prognósticos de impactos (Goedkoop *et al.*, 2013).

No método ReCiPe o indicador midpoint mostra-se aplicável para as empresas de celulose

uma vez que abrange dezoito categorias de impactos que estão relacionados com danos à saúde humana, danos à disponibilidade de recursos naturais e danos à diversidade do ecossistema.

Se o dano for relacionado a saúde humana as categorias de impactos são: a formação de oxidantes fotoquímicos e de material particulado, toxicidade humana, radiação ionizante e mudanças no clima. Se os danos causados forem relacionados à disponibilidade de recursos naturais as categorias de impactos são: a redução de recursos naturais e a redução de combustíveis fósseis. E quando o dano for causado à diversidade do ecossistema as categorias de impactos são: ecotoxicidade e eutrofização em água doce, diminuição da camada de ozônio, eutrofização e ecotoxicidade marinha, acidificação e transformação do solo (Goedkoop *et al.*, 2013).

## **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 10004:**

Resíduos sólidos – Classificação, Norma Técnica, 2ª ed., 2004. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Norma Técnica, 2ª ed., 2004. 20 p.

ALVES, M. V. *Et al.* Comportamento químico do solo e satisfação dos produtores rurais após o uso de cinza. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 1, p. 76-82, 2017.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto. *In*: ANDREOLI, C. V. (Ed. Tec.). **Programa de pesquisa em saneamento básico PROSAB**: Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba. Sanepar, 1999. P. 21-26.

ARAÚJO, J. E. **Tertiary treatment processes to reduce COD and color from a bleached kraft pulp and paper integrated mill**. 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade da madeira; Tecnologia de celulose e papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ARRUDA, J. A. *Et al.* Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 30, p. 18, 29 set. 2016.

ASHRAFI, O. *Et al.* Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. **Journal of environmental management**, v. 158, p. 146-157, 2015.

BAJPAI, P. **Management of pulp and paper mill waste**. 1ª ed. Springer International Publishing. 2015. 197 p.

BAJPAI, P. Water usage in the pulp and paper processes. *In*: BAJPAI, P. **Pulp and paper industry**: emerging waste water treatment technologies, Elsevier Inc. All . p. 37-53, 2017ª.

BAJPAI, P. Reduction of water consumption in pulp and paper mills. *In*: BAJPAI, P. **Pulp and paper industry**: emerging waste water treatment technologies, Elsevier Inc. All. In Pulp and Paper Industry: Elsevier, 2017b, pp. 55-69.

BELLOTE, A. F. J. *Et al.* Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 37, p.99-106, 1998.

BOTERO, W. G. **Caracterização do lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola**. 2008. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2008.

CANA ONLINE. **Vantagens da caldeira de leite fluidizado borbulhante**. 2018. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/vantagens-da-caldeira-de-leite-fluidizado-borbulhante.html>.Wq1fURIU>. Acesso em: 26 mar. 2024.

CARREIRO, M. R. de M. **Análise exergética e ambiental do processamento do licor negro gerado em fábricas de celulose e papel**. 2009. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá.



TSUTIYA, M. T. *Et al.* **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, USP, ESALQ, UNESP, 2001. 468 p.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

DAHL, O. **Papermaking science and technology, environmental management and control**. Volume 19. Second Edition ed. Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2008. 289 p.

DANIEL, A. I. D. *Et al.* Hexenuronic acid contents of Eucalyptus globulus Kraft pulps: variation with pulping condition and effect on ECF bleachability. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 2, n. 5, p. 3-8, 2003.

DE ALMEIDA, B. L. *Et al.* Influência das condições de cozimento na branqueabilidade da polpa marrom – Uma nova abordagem. **Revista o Palpel**, v. 79, n. 4, p. 78-82, 2018.

FERNANDES, F.; SILVA, S. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico PROSAB. Londrina: Universidade Estadual de Londrina – UEL, 2008. 91 p

FIGUEIRÊDO, L. S. *Et al.* Semi empirical modeling of the stationary state of a real causticizing system in a pulp mill. **Latin American Applied Research**, Argentina, v. 42, n. 3, p. 319-326, 2012.

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. E. B. **Resíduos sólidos industriais da produção de celulose Kraft de eucalipto**. Eucalyptus Online Book & Newslette, 2007. 100 p.

FOELKEL, C. E. B. Série de capítulos: utilização da biomassa de eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. 2016. **Eucalyptus online Book Newsletter**. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

FOELKEL, C. E. B. Utilização dos conceitos da Ecoeficiência na Gestão do consumo de água e da geração de efluentes hídricos no processo de celulose Kraft de Eucalipto. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2011. Disponível em: <[https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT23\\_AguasEfluentes.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT23_AguasEfluentes.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2024.

FOELKEL, C. E. B. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto. Parte 3: Lodos & Lodos. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. 2010. Disponível em: [https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20\\_LODOS.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20_LODOS.pdf). Acesso em: 26

mar. 2024.

GIMENES, J. **Análise da geração, recuperação e destinação de cinzas em caldeiras**: o caso de uma indústria. 2012. 97 f. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharelado em Economia e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Paraná 2012.

GOEDKOOOP, M. *Et al.* **ReCiPe 2008**: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Primeira edição, Holanda, 2013. 16 p.

GUIMARÃES, C. C.; FLORIANO, E. P.; VIEIRA, F. C. B. Limitações químicas ao crescimento inicial de *Eucalyptus saligna* em solos arenosos do Pampa Gaúcho: estudo de caso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n.7, p.1183-1190, 2015.

GULLICHSEN, J. Fiber line operations. *In*: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. J. Editors. **Chemical pulping**. Fapet Oy; Helsinki; 1999.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H.; FOGELHOLM, C.-J. **Papermaking science and technology**. Chemical Paping. Book 6<sup>a</sup> ed. Fapet Oy, 2000. 497 p.

HERMOSILLA, D. *Et al.* The application of advanced oxidation technologies to the treatment of effluents from the pulp and paper industry: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 1, p. 168-191, 2015.

HOLMLUND, K.; PARVIAINEN, K. **Evaporation of Black Liquor**. *In*: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. J. **Chemical Pulping**. Helsinki – Finland: Fapet Oy, 2000. P. B37 – B94.

HOWE, K. J. *Et al.* **Princípios de tratamento de água**. São Paulo, SP: Cengage, 2016. 624 p.

HUPA, M. **Recovery boiler chemical principles**. TAPPI Kraft Recovery Course 2007. 2. Disponível em: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/4-4.pdf> Acesso em: 26 mar. De 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ **Relatório Anual IBÁ 2021**. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em 20 de Dezembro de 2022. IBÁ, 2021.

INCE, B. K.; CETECIOGLU, Z.; INCE, O. Pollution prevention in the pulp and paper industries. **Environmental Management in Practice**, v. 5, p. 224-246, 2011.

JORDAN, B. Brightness: basic principles and measurement. *In*: DENCE, C. W.; REEVE, W. (Ed.). **Pulp bleaching: principles and practice**. Atlanta: TAPPI, 1996. P. 695-716.

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 114, p. 326-342, 2015.

LISBÃO, Jr. L. **Sistemas de gerenciamento ambiental**. Seminário da Aracruz Celulose S/A, São Paulo, 1994.

KUDLAVICZ, M. **Dinâmica agrária e a territorialização do complexo celulose/papel na microrregião de Três Lagoas/MS**. 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Ciências Humanas, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2011.

KUNZ, A. *Et al.* Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química nova**, São Paulo, v. 25, p. 78-82, 2002.

LIBÂNIO, M. **Fundamento de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 2010. 496 p.

LOMBARDI, L. R.; LUIZ, A. C. Avaliação da sulfidez do licor branco na qualidade da celulose kraft. **O Papel**, São Paulo, v. 78, n. 7, p. 76-80, 2017.

MAEDA, S.; GOMES, J. B. V.; BOGNOLA, I. A. **Crescimento de Eucalyptus benthamii submetido à aplicação de lama de cal e cinza de madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 9p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 373). 2015.

MACÊDO, A. L. De. **Avaliação de um sistema compacto de tratamento de água por osmose inversa aplicado em um trocador de calor**. 2018. 47 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semiárido.

MELO, J. R. *et al.* Estudo das características do licor negro. *In*: 5º encontro de engenharia e tecnologia dos campos gerais, 2010, ponta grossa. Estudo das características do licor negro. 2010.

MIELI, J. C. De A. **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel**. 2007. 111 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MIMMS, A. *Et al.* **Kraft pulping**: a compilation of notes. Atlanta: Tappi Press, 1989. 183 p.

MORAES, G. De. **Métodos de Abrandamento de Água para Abastecimento**: estudo de caso Habitasul-Jurerê Internacional. 2021.

MUNKITTRICK, K. R. *et al.* Environmental impacts of pulp and paper wastewater: evidence for a reduction in environmental effects at North American pulp mills since 1992. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 2-3, p. 329-338, 1997.

NBR ISO 14040:2009 versão corrigida: 2014. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.

NBR ISO 14044:2009 Versão Corrigida:2014. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

OLIVEIRA, P. P. De. **Fundamentos de termodinâmica aplicada**: análise energética e exergética. Portugal: Lidel-Editora. 2015. 512 p.

PANAMEÑO, R. *et al.* Cleaner production and LCA as complementary tools in environmental assessment: discussing tradeoffs assessment in a case of study within the wood sector in Brazil. **Sustainability**, v. 11, n. 18, p. 5026, 2019.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. São Carlos, 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PEDRAZZI, C. *Et al.* Avaliação das propriedades físicos-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 123-136, 2010.

RIBEIRO, R. M. *Et al.* Utilização da cinza vegetal para calagem e correção de solos – Um estudo de caso para a região metropolitana de Curitiba (RMC). **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 2, n. 3, p. 114-124, 2015.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001. 102 p.

ROSS, S.; EVANS, D. Use of life cycle assessment in environmental management. **Environmental Management**, v. 29, n. 1, p. 132-142, 2002.

SANTOS, P. R. dos. **Análise termodinâmica de um sistema de cogeração com gaseificação de licor negro**. 2007. 113 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIMENTO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO – SEMADESC. **Contas Regionais Relatórios do PIB**. Portal Semadesc, Campo Grande, MS, 2023. Disponível em: <<https://www.semadesc.ms.gov.br/contas-regionais-relatorios-do-pib/>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

SILVA, C. M.; QUADROS, R. **Curso de especialização em celulose: controle ambiental II**. Bahia Sul Celulose S/A, São Paulo, 2000.

SILVA, F. R. *et al.* Cinza de biomassa florestal: alterações nos atributos de solos ácidos do planalto catarinense e em plantas de eucalipto. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.6, p.475-482, Nov./Dec. 2009.

SIMÃO, J. P. F. *Et al.* Evolution of methylglucuronic and hexenuronic acid contents of *Eucalyptus globulus* pulp during Kraft delignification. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 9, p. 2990-2996, 2005.

SIMONETE, M. A. *Et al.* Fornecimento de cálcio para plantas de *Eucalyptus saligna* por meio de aplicação de resíduo industrial lama de cal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1343-1351, 2013.

SOARES, D. R. **Economia Circular na Indústria de Celulose tipo Kraft: aproveitamento**

**de resíduos dregs e grits.** 2018. Tese de Doutorado. PUC-Rio

SOUZA, G. B. D. *Et al.* Enhancement of eucalypt pulp yield through extended impregnation cooking. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 33, n. 2, p. 175-185, 2018.

SCOTT, G. M.; SMITH, A. Sludge characteristics and disposal alternatives for the pulp and paper industry. *In: PROCEEDINGS OF THE 1995 INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL CONFERENCE.* 1995 May 7-10; Atlanta, GA. Atlanta, GA: TAPPI PRESS: 269-279; 1995.

TAPPI, T280 pm-99 standard. **Acetone extractives of wood and pulp.** Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI Press, USA, 2000.

THOMPSON, G. *Et al.* The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. **Bioresource technology**, v. 77, n. 3, p. 275-286, 2001.

VENSON, I. **Estudos em deslignificação de polpas kraft de Pinus spp. Com oxigênio e peróxido.** 2008. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal, Área de Concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná.

VENTORIM, G. *Et al.* A influência dos ácidos hexenurônicos no rendimento e na branqueabilidade da polpa kraft. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 373-377, 2009.

VERAS FILHO, J. M. P. **Análise de contaminantes no processo de fabricação de papel Tissue.** 2018. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Maranhão.

VIANA, E. F. Tratamento de água e efluentes. *In: D'ALMEIDA, M. L. Et al. Celulose.* São Paulo, Editora SENAI-SP, 2013. P. 195-344.

VIEIRA, T. A. S. *Et al.* Determination of the chemical composition of *Eucalyptus* spp. For cellulosic pulp production. **Forests**, v. 12, n. 12, p. 1649, 2021.

WALDEMAR, C. J.; HERRERA, J. Avaliação do potencial de utilização de dregs e do grits como corretivo da acidez e fertilizante na agricultura. *In: CONGRESSO ANUAL DO ABCP,* 19., 1986. São Paulo. **Anais [...].** São Paulo: ABCP, 1986. P. 447-453.

XAVIER, C. R. *et al.* Genotoxic effects of kraft pulp mill effluents treated by biological aerobic systems. **Interciencia**, v. 36, p. 412-416, 2011.

ZIBILSKE, L. M.; CLAPHAM, W. M. Papermill sludge effects on silage corn production. *In: ANNUAL MEETING OF SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA.* 54., 1990, San Antonio. Abstracts... Madison: Soil Science Society of America, 1990. 286 p.

ZEBER, A. C.; JARDIM, C. M. Secagem da polpa branqueada. *In: COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. Branqueamento de polpa celulósica: Da produção da polpa marrom ao produto acabado.* Viçosa, Minas Gerais: Editora UFV, 2015. P. 175-199.

## SEGUNDA PARTE

### **ARTIGO – “ Análise do ciclo de vida em uma planta de produção de polpa celulósica kraft a partir do eucalipto utilizando o software SiMaPro” (versão preliminar)**

#### **1 Introdução**

A sustentabilidade tem ganhado grande notoriedade na indústria de papel e celulose, setor em crescimento no Brasil nos últimos anos. O investimento em novas tecnologias tem mostrado resultados satisfatórios, onde cada vez menos poluentes são enviados ao meio ambiente, através do fechamento do circuito de efluentes possibilitando o tratamento de todo efluente gerado; os gases gerados são lavados em lavadores específicos e os resíduos sólidos são reaproveitados como combustíveis para caldeira no caso dos resíduos da madeira e como corretivos de solo no caso dos dregs e grits. Neste sentido, é importante avaliar o impacto das mudanças no processo ao longo do Ciclo de Vida da celulose *Bleached Eucalyptus Kraft Pulp* (BEKP). Com isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode fornecer aporte apropriado, uma vez que fornece uma visão globalizada. No presente estudo, a ACV, através do software Simapro, a metodologia ReCiPe midpoint, foi aplicada de forma a analisar a produção de celulose BEKP de uma indústria brasileira, buscando avaliar o desempenho ambiental de todo o sistema produtivo.

#### **2 Metodologia**

O presente estudo foi feito com base num quadro metodológico, endossado nas recomendações das ISO 14040 (1997), 14041 (1998), 14042 (2000) e 14043 (2000). A

Avaliação do Ciclo de Vida, de acordo com a que é abordado com a ISO, divide-se em quatro fases: definir um objetivo e escopo, analisar o inventário, avaliar o impacto e interpretação dos dados.

A definição de objetivo e escopo é extremamente importante, uma vez que o estudo será conduzido de acordo com as declarações feitas nesta fase. O objetivo deve referir-se à aplicação e ao público-alvo pretendidos, bem como aos motivos para que seja feito o estudo. Para definir o escopo, é preciso haver alguns itens descritos, como o sistema em estudo, qual unidade funcional (UF) está sendo levada em consideração, os limites do sistema, procedimentos e alocação, metodologias para avaliar o impacto, quais requisitos serão levados em consideração

na qualidade dos dados e as suposições a serem levantadas.

Analisar o inventário envolve coletar dados sobre matérias-primas e consumo energético, emissões atmosféricas, água e solo, e geração de resíduos sólidos.

Avaliar o impacto constitui na atribuição de resultados obtidos no inventário a categorias de impacto, quantificando a potencial contribuição do sistema a diferentes tipos de impacto que o ambiente está exposto.

Por fim, na interpretação dos resultados, o que é obtido na análise de inventário e avaliação de impacto são discutidos e analisados, a fim de identificar questões ambientais significativas, buscando concluir e recomendar fins condizentes com os levantados no objetivo e escopo.

## **2.1 Definição do objetivo e escopo**

O intuito do presente estudo é identificar e avaliar quais impactos ambientais se conectam à produção de celulose da indústria Suzano Papel e Celulose Unidade Três Lagoas –MS. As principais motivações que conduzem este estudo são: determinar como diferentes estágios produtivos da celulose *Bleached Eucalyptus Kraft Pulp* (BEKP) impactam o meio ambiente a partir da análise do ciclo de vida (ACV) da celulose; como as diferentes áreas impactam o meio ambiente, neste sentido, linha de fibras, recuperação química e utilidades.

O objeto de estudo deste trabalho é a produção de celulose BEKP. As matérias-primas que possibilitam a produção desse tipo de material são, principalmente, o cavaco de madeira proveniente de florestas plantadas, reagentes químicos utilizados ao longo dos estágios, água e energia elétrica.

## **2.2 Descrição e limites do sistema do produto**

O presente estudo faz uso da tecnologia típica disponível nas fábricas no Brasil para produzir celulose de eucalipto, por outro lado, é utilizada a tecnologia moderna para produção da polpa, como o processo de cozimento *Lo-Solids*. Os limites do sistema, representados na Tabela 1, incluem as seguintes áreas com seus respectivos estágios.

- Linha de fibras: Pátio de madeira, cozimento, deslignificação, depuração e lavagem, branqueamento, secagem e enfardamento.

- Recuperação química: Evaporação, caldeira de recuperação e caustificação/forno de cal.
- Utilidades: Caldeira de biomassa, turbo gerador, estação de tratamento de água (ETA), estação de tratamento de efluente (ETE) e estação de tratamento de resíduos, estação de tratamento de água para caldeira (ETAC).

### **2.3 Unidade funcional**

A principal meta da unidade funcional (UF) é possuir uma unidade de referência onde os dados obtidos no inventário são normalizados. No presente estudo, a UF é definida como 160 toneladas de polpa *BEKP*, produzido através da polpação Kraft.

### **2.4 Avaliação de impacto**

No presente estudo, a avaliação de impacto considerou as seguintes categorias: Aquecimento global; Formação de material particulado fino; Toxicidade humana carcinogênica; Formação de ozônio (ecossistemas terrestres e saúde humana); Acidificação terrestre.

### **2.5 Requisitos de qualidade dos dados**

Os dados utilizados no inventário foram fornecidos pela indústria Suzano Papel e Celulose Unidade Três Lagoas – MS. O cenário utilizado para a realização do estudo considerou o processo de polpação Kraft sem os controles de emissão. A verificação foi feita através de balanços de massa e energia. Os demais dados foram obtidos através de revisão de literatura e por meio de bancos de dados especializados. Além disso, foi utilizado o método de ACV ReCiPe midpoint através do software SimaPro.

### **2.6 Análise do inventário**

Os dados do inventário foram coletados visando caracterizar os estágios que estão contidos nos limites do sistema identificados no ciclo de vida da celulose *BEKP*. A tabela 1 a seguir mostra a relação de entradas e saídas de cada estágio considerado no estudo.

Tabela 1 - Caracterização e quantificação das entradas e saídas do processo proposto.



	<i>Entrada</i>	<i>Saída</i>
<b><i>Linha de fibras</i></b>		
<b>Pátio de Madeira</b>	3,75 m <sup>3</sup> <i>Woodchips (softwood)</i> 1,8 MW/h <i>Electricity</i>	0,8 m <sup>3</sup> <i>Eucalyptus bark</i> 600 m <sup>3</sup> <i>Woodchips (softwood)</i>
<b>Cozimento</b>	5,2E004 kg <i>Medium pressure steam</i> 2.7 m <sup>3</sup> <i>Rejeito de nós</i> 2,6 m <sup>3</sup> <i>White liquor</i> 3,75 m <sup>3</sup> <i>Woodchips (softwood)</i>	2,6 m <sup>3</sup> <i>Black liquor</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Hydogen sulphide</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Methyl mercaptan</i> 1 ton <i>Brown pulp from the digester</i>
<b>Deslignificação</b>	1,6E004 kg <i>Medium pressure steam</i> 25 kg <i>Oxygen gasous</i> 0,0105 kg <i>Sodium hydroxide</i> 1E003 kg <i>Sulphite Pulp (unbleached)</i>	1E003 kg <i>Sulphite Pulp (unbleached)</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Hydogen sulphide</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Methyl mercaptan</i>
<b>Depuração e lavagem</b>	1E003 kg <i>Sulphite Pulp (unbleached)</i>	1E003 kg <i>Sulphite Pulp (unbleached)</i> 2.8 m <sup>3</sup> <i>Rejeito de nós</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Hydogen sulphide</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Methyl mercaptan</i>
<b>Branqueamento</b>	1E003 kg <i>Sulphite Pulp (unbleached)</i> 0,8625 kg <i>Oxygen gasous</i> 7,26 kg <i>Sodium hydroxide</i> 2,75 kg <i>Hydrogen peroxide</i> 22,1 kg <i>RER:Chlorine dioxide, at pant</i> 7,21 m <sup>3</sup> <i>Sulfuric acid, dimethyl ester</i>	1E003 kg <i>Pulphite Pulp (bleached)</i> 2,46E003 kg <i>Process efluente</i>
<b>Secagem</b>	1E003 kg <i>Sulphite Pulp (bleached)</i> 69000 kg <i>Steam</i>	1E003 kg <i>Pulp fibers</i>

	13,7 MW/h <i>Electricity</i>	
<b>Enfardamento</b>	1E003 kg <i>Pulp fibers</i>	1E003 kg <i>Pulp fibers</i>
<b>Recuperação química</b>		
<b>Evaporação</b>	2,6 m <sup>3</sup> <i>Black liquor</i> 3,5 MW/h <i>Electricity</i>	1 m <sup>3</sup> <i>Hydogen sulphide</i> 1 m <sup>3</sup> <i>Methyl mercaptan</i> 1,7 m <sup>3</sup> <i>Strong black liquor</i>
<b>Caldeira de recuperação</b>	2.9 m <sup>3</sup> <i>Methyl mercaptan</i> 2.10 m <sup>3</sup> <i>Hydogen sulphide</i> 1,7 m <sup>3</sup> <i>Strong black liquor</i> 8,2 MW/h <i>Electricity</i> 256,6 m <sup>3</sup> <i>Demineralized water</i>	2,6 m <sup>3</sup> <i>Green liquor</i> 3,04 ton <i>Steam</i> 0,0005425 ppm <i>NOX</i> 0,000218125 ppm <i>Carbon monoxide</i> 0,000002604 ppm <i>Sulfur dioxide</i>
<b>Caustificação/forno de cal</b>	416 m <sup>3</sup> <i>Green liquor</i> 2,7 MW/h <i>Electricity</i>	416 m <sup>3</sup> <i>White liquor</i> 2.11 m <sup>3</sup> <i>Carbon dioxide</i> 400 kg <i>Dregs</i> 560 kg <i>Grits</i> 0,92 m <sup>3</sup> <i>Lama de cal</i>
<b>Utilidades</b>		
<b>Caldeira de biomassa</b>	8,9 t <i>Eucalyptus bark</i> 1,6 MW/h <i>Electricity</i> 133,4 m <sup>3</sup> <i>Demineralized water</i>	0,2 MJ <i>process Steam</i> 0,0005208 ppm <i>NOX</i> 0,00208 ppm <i>Carbon monoxide</i> 6,5 % <i>Oxygen gasous</i> 0,000085625 ppm <i>Sulfur dioxide</i> 431 kg <i>Cinzas de biomassa</i>
<b>Turbo gerador</b>	0,8375 ton <i>Steam (Caldeira de biomassa)</i> 3,04 ton <i>Steam (Caldeira de Recuperação)</i>	83 MW/h <i>Electricity</i>
<b>Estação de tratamento de água (ETA)</b>	30,78 m <sup>3</sup> <i>Water river</i> 1,38 kg <i>Sodium hypochlorite</i> 0,0005 m <sup>3</sup> <i>Aluminum sulfate</i>	30,78m <sup>3</sup> <i>Industrial treated water</i> 160 kg <i>Waste sludge</i>

	1,0 MW/h <i>Electricity</i>	
<b>Estação de tratamento de efluentes (ETE)</b>	4,8 MW/h <i>Electricity</i> 3948 m <sup>3</sup> <i>Efluent</i> 3,19m <sup>3</sup> <i>Lodo da ETA</i> 21,8 kg <i>Sulfuric acid, dimethyl ester</i>	9,16 m <sup>3</sup> <i>Lodo</i> 3948 m <sup>3</sup> <i>Efluent treated</i>
<b>Estação de tratamento de resíduos</b>	2,5 kg <i>Dregs</i> 3,5 kg <i>Grits</i> 3,19 m <sup>3</sup> <i>Lodo ETE</i> 431 kg <i>Cinzas de biomassa</i> 0,92 m <sup>3</sup> <i>Lama de cal</i>	6,70 kg <i>Soil acidity corrector</i> 1,12 Kg <i>Mineral fertilizer</i> 2,32 kg <i>Organic fertilizer</i>
<b>Estação de tratamento de água para caldeiras (ETAC)</b>	526,5 m <sup>3</sup> <i>Industrial treated water</i> 0,003m <sup>3</sup> <i>Sodium bisulfite</i>	394,875 m <sup>3</sup> <i>Desmineralized water</i> 131,625 m <sup>3</sup> <i>Permeated</i>

Fonte: O Autor (2023).

## 2.7 Avaliação de impacto

A primeira fase de avaliação de impacto é tida como a classificação, onde os resultados do inventário são separados em diferentes categorias de impacto, de acordo com os tipos de impacto esperados no meio ambiente. Na Tabela 2, é possível ver os parâmetros do inventário que foram considerados no presente estudo, bem como as categorias de impacto selecionadas para a análise.

Tabela 2 - Parâmetros usados em cada categoria de impacto.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Parâmetro</b>
Aquecimento global	Kg CO2 equivalente
Formação de material particulado fino	Kg PM 2.5 equivalente
Toxicidade humana carcinogênica	Kg 1,4-DCB
Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)	Kg Nox equivalente

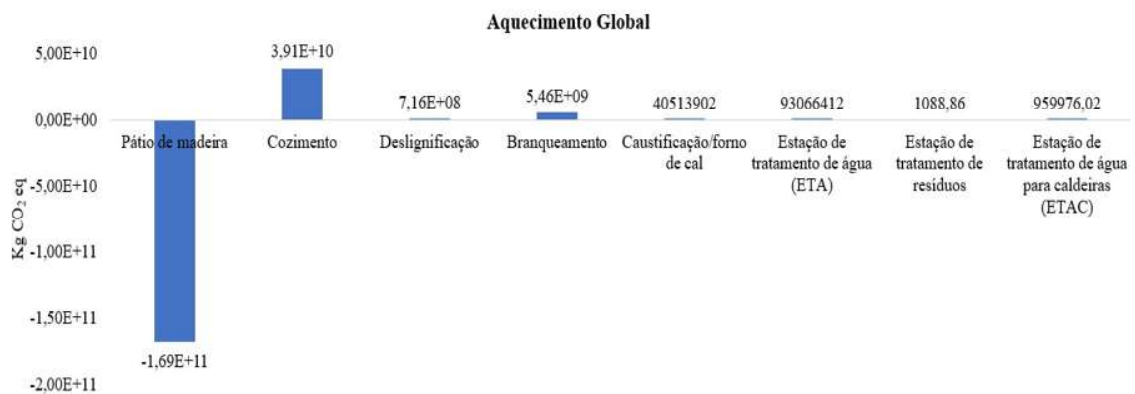
Formação de ozônio (saúde humana)	Kg Nox equivalente
Acidificação terrestre	Kg SO2 equivalente

Fonte: Autor (2023).

### 3 Resultados

#### 3.1 Aquecimento global

Figura 1 - Impactos ambientais quanto ao potencial de aquecimento global em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

Del rio et al. (2022) descrevem que em média, uma tonelada de celulose gera 951 Kg CO<sub>2</sub> equivalente levando em consideração todos os estágios da polpação Kraft. Apesar dos valores distintos em relação a literatura, destaca-se que neste estudo foi utilizado o potencial de aquecimento global para 100 anos com base no IPCC.

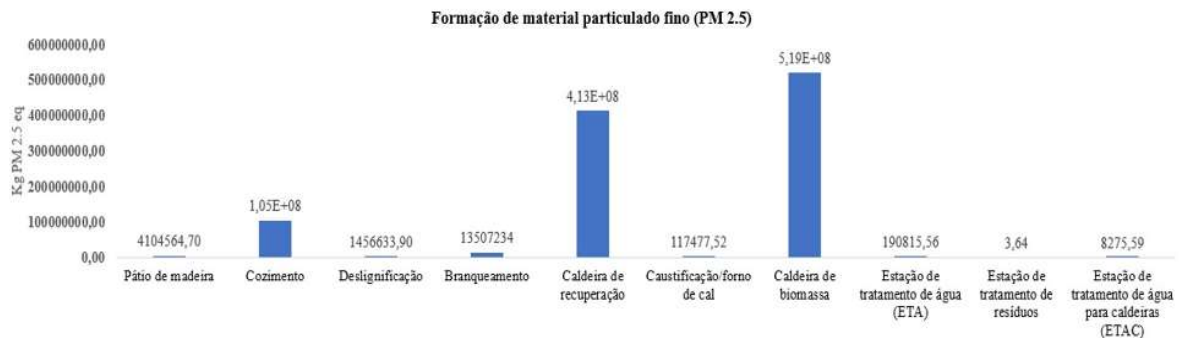
O pátio de madeira (Figura 1) apresenta uma emissão negativa pois leva em consideração as plantações de eucalipto que dão origem aos cavacos de madeira. Neste sentido, evidencia o processo Kraft como positivo ao meio ambiente uma vez que sequestra carbono no crescimento das florestas plantadas. Bastin et al. (2020) mostraram que até 2030 haverá a restauração de 350 milhões de hectares de florestas que poderão sequestrar cerca de 1,7 Gton de CO<sub>2</sub> equivalente por ano.

Os processos de cozimento e branqueamento mostram maior geração de gases de efeito estufa, corroborando com Wernet et al. (2016) e Tomberlin, Venditti e Yao (2020) que

mostraram um maior fator de emissão de Kg CO<sub>2</sub> equivalente estão relacionados aos químicos utilizados nestes dois estágios de polpação, dentre eles sulfeto de sódio, ozônio e cloreto.

### 3.2 Formação de material particulado fino

Figura 2 - Impactos ambientais quanto a formação de material particulado fino (PM 2.5) em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

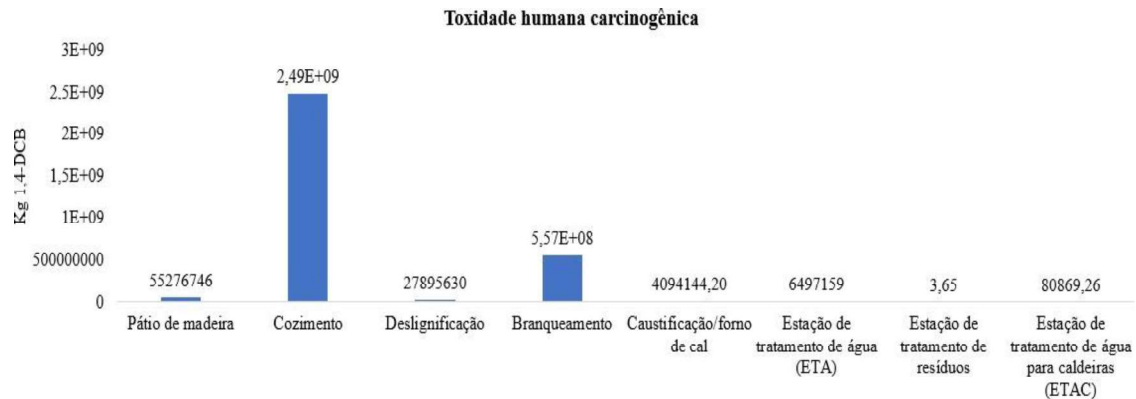
Níveis próximos de material particulado foram identificados na caldeira de recuperação e caldeira de biomassa como demonstrado na Figura 2. De acordo com Hoffman et al. (2017) a queima de biomassa pode levar ao aumento das emissões de material particulado fino, além de compostos orgânicos voláteis. Por sua vez, Tran e Vakkilainen (2007) demonstram que a maior emissão de material particulado está relacionado a caldeira de recuperação química, diferindo dos resultados do presente trabalho e das proximidades dos valores encontrados.

O cozimento da celulose apresenta menor geração de material particulado fino, entretanto na mesma ordem de grandeza dos demais estágios significativos, devido ao material que se desprende dos cavacos de madeira no silo de cavacos antes de entrar no digestor.

### 3.3 Toxicidade humana carcinogênica

A diferença nos valores de impacto mostrados na Figura 3 devem-se ao grau de deslignificação da polpa celulósica em função do estágio ao longo do processo Kraft.

Figura 3 - Impactos ambientais quanto a toxicidade humana carcinogênica em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com Soskolne e Sieswerda et al. (2010) a toxicidade dos processos de cozimento estão relacionadas aos componentes carcinogênicos como sulfeto de hidrogênio e metil mercaptano, enquanto o branqueamento utiliza reagentes com base em cloro. Ainda segundo os autores, os riscos significativos a saúde humana quanto a câncer no cérebro e fígado.

### 3.4 Formação ozônio (ecossistemas terrestres e saúde humana)

Em relação a formação do ozônio, em função de reagentes com base em óxidos e nitrogênio (NOx), foi avaliado juntamente os impactos nos ecossistemas terrestres e na saúde humana como mostras as Figuras 4 e 5. Destaca-se que, seguindo o inventário, tanto a caldeira de recuperação quanto a caldeira de biomassa apresentam como saídas do estágio o NOx.

Figura 4 - Impactos ambientais quanto a formação de ozônio (ecossistemas terrestres) em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5 - Impactos ambientais quanto a formação de ozônio (saúde humana) em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com Massa (2022), o NOx impacta principalmente a vegetação através de danos ao tecido vegetal, assim como contribui para a acidificação dos ecossistemas. Ainda de acordo com os autores, pessoas com doenças respiratórias como a asma e doenças pulmonares crônicas são mais sensíveis aos NOx e a exposição prolongada pode agravar os casos clínicos. Os maiores resultados da caldeira de recuperação estão atreladas a entrada do licor negro para recuperação, enquanto a caldeira e biomassa apresenta menor valor devido à utilização de resíduos do descascamento. Estas duas entradas têm em comum a lignina que está em maior concentração, juntamente com outros compostos, no licor negro.

### 3.5 Acidificação terrestre

Similar aos resultados encontrados no item 3.4, a acidificação terrestre possui maior valor referente à caldeira de recuperação seguida pela caldeira de biomassa. Além disso, a acidificação terrestre (Figura 6) possui como resultado valores com base no dióxido de enxofre, tendo a unidade representada por Kg SO<sub>2</sub> equivalente.

Figura 6 - Impactos ambientais quanto a acidificação terrestre em diferentes estágios.



Fonte: Autor (2023).

Melo (2011) cita que no ciclo de recuperação química do carbonato de cálcio, o forno de cal é responsável por emitir resíduos com base em SO<sub>x</sub>, assim como tem na entrada do estágio a utilização do sulfeto de hidrogênio, corroborando com os valores encontrados neste estudo no estágio da caldeira de recuperação. Por sua vez, a caldeira de biomassa emite este componente devido ao lodo biológico que advém da estação de tratamento de efluentes e ao Na<sub>2</sub>S presente no licor de cozimento que está inserido na biomassa que é depurada no estágio de depuração e lavagem e enviado para a queima na caldeira.

Nadadur et al. (2007) mostram que compostos com base em SO<sub>x</sub> afetam significativamente a fotossíntese e consequente crescimento das plantas, uma vez que os efeitos indiretos da chuva ácida ocorrem através da deposição no solo e na água.

#### 4 Conclusão

As indústrias de celulose moderna tem investido cada vez mais em tecnologia com o objetivo de minimizar os impactos causados ao meio ambiente com o seu processo produtivo. A geração de resíduos sólidos, gasosos e líquidos são inevitáveis, porém, o tratamento adequado destes resíduos, levam a um reaproveitamento dos compostos destes resíduos sólidos para correção de acidez do solo, os gases são lavados em lavadores específicos evitando o envio de poluentes para atmosfera e o efluentes líquidos são tratados de forma que se adequem a legislação vigente para retornar ao rio. Isto foi demonstrado com os resultados obtidos na aplicação da análise do ciclo de vida que avaliou os impactos que afetam diretamente o aquecimento global, a formação de material particulado fino, a toxicidade humana carcinogênica, a formação de ozônio que afetam tanto o ecossistemas terrestres quanto a saúde humana.



Foi verificado um impacto positivo quando ao aquecimento global devido ao plantio de eucalipto utilizado para a produção da celulose, mostrando negativo valor do balanço em termos de Kg CO<sub>2</sub> equivalente.

Os materiais particulados finos vão de acordo com a literatura em relação a caldeira de recuperação. Entretanto, a caldeira de biomassa mostrou valores próximos e que representam uma fonte de investigação.

A toxicidade carcinogênica humana está diretamente aos processos principais de deslignificação do processo Kraft, atrelada aos componentes principais dos dois estágios, sulfeto de hidrogênio e cloro.

Os impactos com base em NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> mostraram a mesma tendência em relação aos estágios representados nas categorias das Figuras 4, 5 e 6. Tais impactos mostram direto impacto negativo tanto na saúde humana quanto no meio ambiente.

Para futuros trabalhos é recomendado mostrar outro cenário com os controles de emissão para confrontar com os dados gerados no presente trabalho. Assim como, outros processos de polpação como o semi químico e mecânico utilizados em outros países também podem ser considerados como potenciais cenários de comparação.

## REFERÊNCIAS

Bastin, J. F. et al. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448):76-79.

Del Rio, D. D. F. et al. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167:112706.

Hoffman, E. et al. (2017). Pilot study investigating ambient air toxics emissions near a Canadian kraft pulp and paper facility in Pictou County, Nova Scotia. *Environmental Science and Pollution Research*, 24:20685-20698.

Nadadur, S. S. et al. (2007). The complexities of air pollution regulation: the need for an integrated research and regulatory perspective. *Toxicological sciences*, 100(2):318-327.

Melo, J. E. A. (2011). Estudo das características do licor preto. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 3(1):1-11.

Tomberlin, K. E., Venditti, R., & Yao, Y. (2020). Life cycle carbon footprint analysis of pulp and paper grades in the united states using production-line-based data and integration. *BioResources*, 15(2):3899-3914.

Tran, H., & Vakkilainen, E. K. Advances in the Kraft chemical recovery process. In *3rd ICEP international colloquium on eucalyptus pulp*. Belo Horizonte, Brazil. 2007. (pp. 4-7).

Wernet, G. et al. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21:1218-1230.