

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA O  
TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FABRICAÇÃO INTEGRADA DE PAPEL  
TISSUE E PAPELÃO**

**MARIANA SHIRAISHI PAULINO**

RA: 744814; e-mail: mariana.paulino@estudante.ufscar.br

Trabalho de graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química  
da Universidade Federal de São Carlos

Profa. Orientadora: Gabriela Cantarelli Lopes

**SÃO CARLOS  
SETEMBRO/2022**

## **BANCA EXAMINADORA**

**Orientador:** Profa. Gabriela Cantarelli Lopes

**Convidado:** Prof. Edson Luiz Silva

**Professor da disciplina:** Prof. Ernesto Urchieta-Gonzalez

Trabalho de graduação apresentado no dia 13/09/2022 perante a seguinte banca examinadora.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Claudia e Sidney, e minha irmã, Maitê, que me incentivaram nos momentos difíceis e me apoiaram no caminho até aqui.

Aos amigos, que cultivei durante a graduação, e que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que me dediquei à graduação de Engenharia Química, em especial à Mariana Previtale, Carolina Correa, Maria Vitoria, Alexandre Massei e Leonardo Lima.

A todos da empresa Bain & Company, que me deram a oportunidade de seguir em um projeto de estágio em contato com duas empresas do ramo de papel e celulose, Carta Fabril e Softys Brasil, e me apoiaram durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

À UFSCar pela dedicação aos alunos e pelo caminho traçado durante minha vida acadêmica, durante o período de realização do curso de Engenharia Química e durante o desenvolvimento do presente trabalho. Em especial para a Profa. Gabriela que me acompanhou desde o início do desenvolvimento do presente trabalho.

## RESUMO

A celulose é a matéria orgânica mais abundante na natureza, sendo um componente básico dos tecidos vegetais, que confere rigidez e firmeza às plantas. Seus usos estão sendo cada vez mais diversificados no ramo industrial, podendo atualmente ser utilizada para produção de diferentes tipos de papel (jornal, papel branco comum, papelão), tecidos, alguns fármacos, entre outros. É de conhecimento geral que o setor de produção de papel é um grande consumidor de água. Logo, é de interesse público e ambiental que a água utilizada seja reutilizada ou, no mínimo, tratada, para retornar ao meio ambiente. A crescente preocupação com a preservação ambiental requer a eliminação e/ou redução dos efeitos negativos do processo produtivo. A grande maioria da produção dos rolos tipo jumbo (que são rolos maiores e intermediários, que dão origem ao produto final) é bastante parecida nas fabricações de papel Tissue e de papelão. A qualidade do papel dos rolos tipo jumbo irá depender das exigências de qualidade na produção. Produtos de maior qualidade possuem maior quantidade de celulose pura em sua composição, enquanto produtos de menor qualidade possuem outras fontes de materiais celulósicos, como as aparas. Por não haver exigência de alta qualidade na produção de papelão, as aparas são componentes comuns na produção dos jumbos usados para este fim. Os jumbos para produção de papel Tissue também não requerem alto controle de qualidade, também sendo produzidos a partir de aparas. A utilização de aparas durante o processo de fabricação faz com que o tratamento do efluente deva ser mais extenso e mais eficaz do que aquele para o efluente advindo de uma produção com celulose pura. Isso ocorre porque as aparas são matérias primas não puras, que carregam sujeiras e outros componentes não desejados. Apesar da similaridade nas características da matéria prima celulósica usada na produção dos papéis do tipo Tissue e do papelão, até o momento, não foi encontrado registro do tratamento integrado dos efluentes gerados nesses dois tipos de processo. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi encontrar a melhor solução para o tratamento do efluente da produção de Tissue de baixa qualidade e de papelão, a partir da integração da produção dos tipos de jumbos utilizados para cada um destes tipos de papel, através da avaliação técnica dos diferentes tipos de tratamento disponíveis. Um melhor resultado do tratamento do efluente da indústria pode ser obtido pela combinação de Estação completa de tratamento de efluentes e tratamento biológico anaeróbico. Ambos apresentam pontos positivos e negativos que podem se complementar apesar de um maior investimento inicial necessário.

**Palavras-chave:** Produção de papel, Papel Tissue, Papelão, Efluentes, Tratamento

## ABSTRACT

Cellulose is the most abundant organic material in nature, and is a basic component of plant tissues, which provides rigidity and firmness to plants. Its uses are becoming more and more diversified in the industry, and it can currently be used to produce different types of paper (newsprint, plain white paper, cardboard), textiles, some pharmaceuticals, among others. It is common knowledge that the paper production sector is a major consumer of water. Therefore, it is of public and environmental interest that the water from the process is reused or, at least, treated to return to the environment. The growing concern with environmental preservation requires the elimination and/or reduction of the negative effects of the production process. Most of the production of jumbo rolls (which are larger, intermediate rolls that originates the final product) is quite similar in the Tissue paper and paperboard mills. The paper quality of the jumbo rolls will depend on the quality requirements in the production. Higher quality products have more pure pulp in their composition, while lower quality products have other sources of pulp materials, such as scraps. Because there is no requirement for high quality in the production of cardboard, scraps are a common component in the production of the jumbo used for this purpose. The jumbo for low quality Tissue paper production also do not require high quality control and are also produced from scraps. The use of scraps during the manufacturing process means that the effluent treatment must be more extensive and more effective than the one for the effluent from a pure pulp production. This is because the scraps are not pure raw materials, they also carry dirt and other unwanted components. Despite the similarity in the characteristics of the cellulosic raw material used in the production of tissue papers and cardboard, there are no record of integrated treatment of the effluents generated in these two types of processes. In this context, the main objective of this work was to contemplate and find the best solution for the treatment of the effluent from the production of low quality Tissue and cardboard, from the integration of the production of the types of jumbo rolls used for each one, through a technical evaluation of the different types of treatment that are available. A better result of the effluent treatment can be obtained by the combination of the Effluents Station and the anaerobic biologic treatment. Both present positive and negative point that complement each other, even though it requires a bigger initial investment.

**Key-words:** Paper production, Tissue paper, Cardboard paper, effluents, treatment

## SUMÁRIO

<b>BANCA EXAMINADORA.....</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>viii</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Indústria de papel e celulose.....	3
2.1.1. O papel.....	3
2.1.2. O mercado.....	7
2.1.3. A indústria.....	11
2.1.4. Dados da indústria.....	12
2.2. A produção de papel.....	13
2.2.1. Produção de papel Tissue.....	17
2.2.2. Produção de papelão.....	18
2.3. Tratamento de efluentes.....	18
2.4. Legislação.....	22
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
3.1. Integração da indústria de papel e celulose.....	24
<b>4 DISCUSSÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
4.1. Tratamento de efluente da indústria de papel e celulose.....	26
4.1.1. Tratamento em ETE comum de planta de papel e celulose.....	29
4.1.1.1. Tratamento em lagoa de estabilização.....	31
4.1.1.2. Tratamento por lodo ativado.....	33
4.1.1.3. Tratamento por filtro biológico.....	35
4.1.1.4. Diferentes sistemas de ETEs nas indústrias atuais.....	36
4.1.2. Tratamento biológico anaeróbio.....	38
4.2. Pós-tratamento de efluentes na indústria de papel.....	46

4.3.	Investimentos necessários em cada tipo de tratamento.....	47
4.4.	Resultados.....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Componentes majoritários da parede celular vegetal e estrutura química encontrados em produtos celulósicos como o papel.....	6
Figura 2:	Produção por tipo de papel no Brasil em 2020 e variação em relação a 2019.....	9
Figura 3:	Dados de expedição de papelão ondulado (papel de embalagem) em toneladas em médias trimestrais.....	10
Figura 4:	Comércio de papéis para fins sanitários.....	10
Figura 5:	Ciclo de produção e verticalização da indústria de papel e celulose.....	12
Figura 6:	Fluxograma tradicional do processo de produção de papel de uma indústria em Santa Catarina.....	14
Figura 7:	Desagregador ou <i>pulper</i> para preparo de massa celulósica.....	15
Figura 8a:	Máquina papeleira com as 4 funções básicas.....	15
Figura 8b:	Caminho do papel desde a formação até a enroladeira (Yankee representa a parte de secagem).....	16
Figura 9:	Rolos de jumbos no armazém da empresa Carta Fabril no Rio de Janeiro	16
Figura 10:	Esquema da estrutura de um papelão.....	19
Figura 11:	Fluxograma simplificado do processo de produção do papel.....	20
Figura 12:	Processo de remoção de água por cilindros durante a passagem do papel pela máquina papeleira.....	20
Figura 13:	Esquema de filtro biológico com leito fixo.....	35
Figura 14:	Esquema da digestão anaeróbia da matéria orgânica.....	40
Figura 15:	Biorreator do modelo UASB.....	43



## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1:	Composição típica de alguns lignocelulósicos.....	7
Quadro 2:	Ranking dos maiores exportadores de celulose no mundo em 2020.....	8
Quadro 3:	Ranking dos maiores produtores de papel no mundo em 2020.....	8
Quadro 4:	Características e usos da pasta mecânica de celulose.....	13
Quadro 5:	Eliminação de água nas três principais seções da máquina papelreira.....	21
Quadro 6:	Características do efluente de uma indústria de papel e papelão.....	21
Quadro 7:	Resumo do tratamento utilizado em algumas indústrias do ramo de papel e celulose.....	38
Quadro 8:	Características do efluente gerado pela indústria de papel.....	44
Quadro 9:	Exemplos típicos do uso de tecnologias no tratamento anaeróbio para produção de biogás na indústria de papel e celulose.....	45
Quadro 10:	Etapas constituintes do tratamento por lagoa de estabilização.....	48
Quadro 11:	Custos estimados para implantação de lagoas de estabilização.....	49
Quadro 12:	Etapas constituintes do tratamento por sistema de lodo ativado.....	49
Quadro 13:	Custos estimados para implantação de sistema de lodo ativado.....	50
Quadro 14:	Etapas constituintes do tratamento por coagulação, floculação e sedimentação.....	50
Quadro 15:	Custos estimados para implantação de sistema de coagulação, floculação e sedimentação.....	51
Quadro 16:	Etapas constituintes do tratamento por biodigestão anaeróbia com recuperação de biogás.....	52
Quadro 17:	Custos estimados para implantação de sistema de digestão anaeróbia.....	52

## NOMENCLATURA

<b>ANAP</b>	Associação Nacional dos Aparistas de Papel
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>DBO</b>	Demanda Biológica de Oxigênio
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxigênio
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Efluentes
<b>IBA</b>	Indústria Brasileira de Árvores
<b>IBAMA</b>	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
<b>FAO</b>	<i>Food and Agriculture organization of the United Nations</i>
<b>N</b>	Nitrogênio
<b>P</b>	Fósforo
<b>SST</b>	Sólidos Suspensos Totais
<b>UASB</b>	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
<b>UNT</b>	Unidade Nefelométrica de Turbidez

## 1. INTRODUÇÃO

O papel tem como matéria prima fundamental a celulose, cuja origem se dá em fontes renováveis. É um produto amplamente produzido e consumido em todos os países do mundo, sendo, portanto, uma das maiores fontes de poluição ambiental do globo.

Além da própria disposição do resíduo de papel gerado após o uso deste material, existe ainda a questão ambiental que está relacionada à produção do papel, já que o processo produtivo do papel envolve a utilização de grandes volumes de água.

A problemática de disposição dos efluentes da produção de papel deve ser analisada com cautela para que não haja prejuízos para o meio ambiente, e tampouco malefícios para a empresa que os gera, como por exemplo, gastos muito altos com o tratamento destes efluentes, diminuindo a margem de lucro dos produtos.

A produção de papel do tipo Tissue, conhecido por suas aplicações como papéis de higiene, podendo ser exemplificado por papel higiênico e toalhas de papel, assim como a produção de papelão, são os processos do ramo de papel e celulose que mais geram resíduos líquidos durante a fabricação em si (ANAP, 2018). Isso ocorre uma vez que, por se tratar de materiais com baixo valor agregado, busca-se baratear a produção utilizando matérias primas não puras.

O barateamento da produção gera ainda mais resíduos líquidos na produção, dado que fazer 1 tonelada de papel gera em torno de 115 mil litros de efluente de água (DATASCOPE, 2019). Se faz necessário em torno de 10% a mais de água no procedimento apenas para limpar as aparas. Estas são a matéria prima utilizada em detrimento da madeira. As aparas são sobras de materiais aparados e/ou cortados durante o processo de fabricação do papel, que podem ser comercializados ou recolhidos da própria produção de papel, advindo da fabricação a partir de celulose pura.

Muitas indústrias de papel ainda não conseguem ser 100% verticalizadas por não tratar seus resíduos diretamente e terceirizar essa parte do processo. Entender as possíveis maneiras de fazer esse tratamento de efluentes é essencial para melhoria nos lucros e, principalmente, para o meio ambiente.

O tratamento de efluentes líquidos do ramo de papel e celulose é normalmente feito em ETE comum, e segue o mesmo esquema de tratamento de água do efluente coletado em ambientes residenciais, apesar de ocorrer em ambientes e estações separadas. A principal diferença entre eles é a quantidade de produtos que devem ser utilizados no processo, assim como um maior cuidado em cada etapa. Isso porque a qualidade de um efluente advindo da

indústria é inferior aquele efluente residencial, no qual os níveis de poluentes e outros fatores são em geral muito mais baixos, conforme será apresentado mais adiante.

Dependendo da qualidade da matéria prima utilizada no processo, o efluente pode não ser tratado da melhor forma pela ETE (GIORDANO, 2003). Isso porque a matéria-prima que é utilizada no processo de produção do papel tem influência direta sobre a composição da água residuária do processo. Sendo assim, a pesquisa sobre outros modos de tratamento de efluentes é necessária. Assim como a caracterização de cada indústria em específico deve ser levado em conta antes da decisão final de tratamento do efluente.

A análise de alternativas ao tratamento de efluente a partir de ETE comum, é um estudo em alta no momento, pela crescente preocupação com a preservação ao meio ambiente. Diversas formas de tratamento já foram pesquisadas. No entanto, a implementação é muitas vezes deixada em segundo plano por um alto custo inicial de implantação do tratamento, acarretando escolhas de investimentos com maior retorno no tempo. Isso acaba deixando muitos estudos com informações inconclusivas pela falta de procedimentos empíricos nas empresas do ramo.

O intuito do presente trabalho é fazer uma análise técnica sobre os tipos de tratamento disponíveis e que ainda estão em estudo, que podem ser aplicados à indústria de papel Tissue e de papelão, dado que, dentro do ramo de papel e celulose, são os produtos que geram efluentes com pior qualidade em relação ao aceito pela legislação, conforme será apresentado durante o desenvolvimento do trabalho.

O principal ponto a ser analisado é o quanto o tratamento se mostra efetivo para a indústria de papel e papelão. Um segundo fator que deve ser levado em consideração é a relação custo/benefício de cada processo, uma vez que todo o esforço de ter efluentes com mais impurezas é justamente o barateamento do processo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão revisados os principais pontos que devem se ter em mente para uma análise mais crítica sobre os tratamentos de efluentes que serão apresentados ao longo do presente trabalho. Estes tópicos incluem o entendimento de uma indústria de celulose, papel e papelão, além dos conceitos utilizados para os tratamentos pesquisados e estudados.

### **2.1. Indústria de papel e celulose**

É importante ressaltar o papel da indústria em estudo, cada parte a ser analisada pode depender de um movimento histórico. Se faz então necessária uma avaliação da indústria e do mercado como um todo, além da visão sobre a indústria em específico dos tipos de papel em questão no presente trabalho.

#### **2.1.1. O Papel**

Apesar de haver divergências quanto ao início de seu uso e de sua produção real, o papel parece ter sua origem na China. A sua criação como se conhece hoje pode ser atribuída ao oficial da corte T'sai Lun.

Em 105 d.C., o oficial observou vespas triturando fibras vegetais de bambu e amoreira, de forma que conseguiam obter uma pasta, com base celulósica, utilizada na construção dos ninhos, durante uma viagem a Pequim.

No intuito de fazer um teste do processo seguido pelas vespas, ele fez uma mistura umedecida de casca de amoreira, cânhamo, restos de roupas, e outros produtos que contivessem fonte de fibras vegetais. Ele cozeu, bateu e esmagou essa mistura até obter uma pasta úmida. Com este componente pronto, T'sai estendeu e colocou para secar uma fina camada da pasta. Foi assim que a primeira folha de papel teve sua origem.

A produção do papel da forma que T'sai desenvolveu, ficou por muito tempo apenas entre a comunidade chinesa. A confecção só chegou na Coreia no século VIII, propagando-se para o Japão pouco tempo depois (FRUGONI, 2007).

Ainda assim, o que foi determinante para que a produção de papel se propagasse para o restante do mundo, foi o contato entre chineses e árabes no século VIII, durante a Batalha de Talas, às margens do Rio Talas, entreposto das caravanas comerciais chinesas, na Ásia Central.

No Brasil, a presença do papel aconteceu apenas durante o período de descobrimento do país, através da carta de Pero Vaz de Caminha. A primeira referência à manufatura do papel em solo nacional se encontra em um documento atualmente sob guarda do Museu Imperial, no qual o botânico e frei, José Mariano da Conceição Velozo, notifica ao conde de Linhares, dom Rodrigo Domingos de Souza Teixeira de Andrade Barbosa, então ministro do príncipe regente dom João, sua vivência durante experimentação na produção de papel (MOTTA e SALGADO, 1971).

A maior parte da produção de papel atual, no Brasil, é feita a partir da madeira de árvores cultivadas. A estrutura porosa do papel, como da pedra pome, é o que lhe confere a característica diferente dos tecidos de algodão.

No Brasil, 95% da produção industrial de papel tem como matéria-prima a madeira reflorestada de pinus e de eucalipto. A madeira é um material renovável, abundante, e embora as duas espécies citadas não sejam nativas do Brasil, o crescimento delas em solo nacional é muito mais rápido que em seus países de origem, favorecendo seu uso.

Existem diferentes tipos de papel no mercado, que variam desde peso e espessura. Pode-se também variar suas aplicações, modos de uso, qualidade e até finalidade de uso. No mercado mundial, o papel é tradicionalmente segmentado pelo uso final dos produtos, alguns exemplos:

- Papéis de embalagem (*corrugating materials / wrapping papers*);
- Papéis de imprimir ou escrever (*printing / writing papers*);
- Ondulado ou papelão (*cardboards*);
- Papel de imprensa (*newsprint*);
- Papéis para fins sanitários (*Tissue papers*);
- Cartões e cartolinas (*carton-board*);
- Outros tipos de papéis: entre eles os para usos especiais (por exemplo, papel carbono, cigarro, desenho, papéis térmicos etc.).

Para entender melhor algumas diferenças entre esses diferentes usos, e o impacto sobre a produção desses papéis, pode-se analisar as propriedades do papel, da matéria prima, e o processo industrial do qual dependem.

Para cada uso, o papel precisa de propriedades diferentes, como maior rigidez, maior resistência, maior absorção, entre outros. Existem três tipos de celulose que podem ser usadas como preparo para o papel final: a pasta mecânica, a celulose semi-química, e a celulose sulfato/Kraft. Os três tipos de celulose seguem o mesmo processo de fabricação uma vez que estão com as massas celulósicas preparadas para uso na produção de papel, sendo assim, não é necessária distinção maior entre elas.

Por outro lado, apesar dos diferentes usos, o papel, de forma geral, é um composto de origem vegetal, o qual tem sua composição química variando conforme o tipo de vegetal que se utiliza em sua fabricação.

No entanto, sua composição conta praticamente com os mesmos compostos: a celulose, a lignina e as hemiceluloses, que contam como principais constituintes macromoleculares. Todos são advindos da madeira utilizada para sua produção primária. A partir das características de cada composto do papel, pode-se entender melhor o tipo de celulose necessária para cada processo e o porquê.

É importante delimitar o que são cada um desses compostos. A celulose, como principal constituindo do papel, se apresenta como um polímero linear de glicose que possui alta massa molecular. Esse polímero é formado de ligações  $\beta$ -1,4 glicosídicas, e possui como característica ser insolúvel em água. A celulose é também considerada como principal componente da parede celular da biomassa vegetal.

O polímero que gera o composto da celulose pode se apresentar como um polímero de cadeia longa. As unidades de glicose neste polímero podem variar entre 15 a 15.000. Em geral, os polímeros apresentam em torno de 3.000 unidades. A celulose é o composto que gera as fibras que são capazes de fazer o papel, enquanto este apresenta características de um material poroso por conta da presença deste composto.

As hemiceluloses por sua vez podem ser caracterizadas por um grupo de polissacarídeos. Estes grupos são compostos de diversos tipos de unidades de açúcar, sendo estes solúveis em álcali. Assim como a celulose, a hemicelulose também está presente na parede celular da biomassa vegetal. Os polissacarídeos que compõem as hemiceluloses incluem: 4 substâncias pécicas,  $\beta$ -glucana não celulósica, e diversos tipos de açúcares (como exemplo: D-xilose, D-manose, D-glicose, D-galactose e D-galactourônico) (FENGEL e WEGENER, 1989).

As hemiceluloses são importantes uma vez que são os compostos responsáveis por algumas propriedades obtidas ao longo do tempo de processamento de materiais lignocelulósicos. As hemiceluloses possuem grande capacidade de absorção de água, isso porque as hemiceluloses não apresentam cristalinidade, possuem baixa massa celular e ainda uma configuração estrutural irregular (FENGEL e WEGENER, 1989).

A capacidade de absorção de água associada com as hemiceluloses é útil na produção de papel, uma vez que ajuda a reduzir tempo uso de energia durante o processo de refino da pasta celulósica. Este fato também ocasiona no aumento da área específica ou de ligação das

fibras. Por essa razão as hemiceluloses também são responsáveis pela ligação química entre as fibras, e traz a capacidade de absorção do material final.

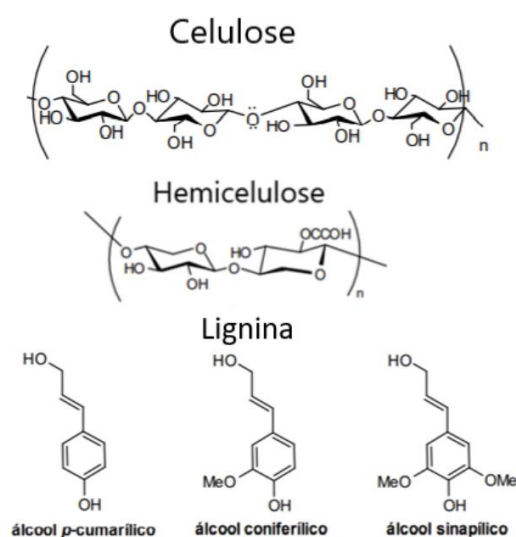
Por fim, o próximo composto é a lignina. A lignina é classificada como um polifenol, que é construído de unidades de fenil-propanas (C6-C3). A lignina não tem estrutura cristalina e pode ser considerada como polímero amorfo. A estrutura principal da lignina, é gerada pela polimerização dehidrogenativa (iniciada por enzimas) de alguns precursores primários, que são: álcool trans-coniferílico, álcool trans-sinapílico e álcool trans-para-cumárico.

A lignina está associada juntamente com a celulose e hemicelulose dentro da biomassa vegetal. Essa combinação entre os dois compostos impede a degradação desses materiais. Em outras palavras, a lignina confere firmeza e rigidez ao conjunto de fibras de celulose. A lignina não deve ser considerada substância química única, mas como classe de materiais correlatos.

A lignina é a razão de a pasta mecânica, brevemente mencionada anteriormente, ser de baixo custo e resistência reduzida, uma vez que é o composto que confere rigidez e que, passando por um processo mecânico, libera os outros dois compostos para diferentes ligações, mais opaca, pela celulose, e mais absorvente pela hemicelulose.

Na Figura 1 pode-se ver uma configuração dos componentes majoritários comentados: primeiro a cadeia de uma unidade de celulose, em segundo a cadeia de uma unidade de hemicelulose e por fim cadeias possíveis de hemiceluloses.

**Figura 1: Componentes majoritários da parede celular vegetal e estrutura química encontrados em produtos celulósicos como o papel.**



**Fonte:** Adaptado de Scopel (2019).



Ainda, cada tipo de matéria prima usada possui diferentes quantidades e composições com cada um destes compostos. É a partir dessa diferenciação que a matéria prima é escolhida para o processo, de acordo com o fim desejado, e a quantidade de químicos é exigido. Para se ter uma melhor visão sobre esse aspecto, pode-se consultar o Quadro 1.

**Quadro 1: Composição típica de alguns lignocelulósicos.**

<b>Componente</b>	<b>Faixa de variação típica (%)</b>	<b>Madeira dura Eucaliptus</b>	<b>Madeira mole Pinus</b>	<b>Bagaço de cana</b>	<b>Palha de milho</b>
<b>Celulose</b>	40-50	34-48	40-45	30-39	45
<b>Hemicelulose</b>	25-35	20-25	10-13	24-30	35
<b>Lignina</b>	15-25	20-29	26-34	18-22	15
<b>Cinzas</b>	-	0,3-1,2	0,2-0,8	1-4	45
<b>Comprimento de fibra (mm)</b>	-	0,7-1,6	2,7-3,6	1,0-2,0	-
<b>Diâmetro de fibra (µm)</b>	-	20-40	32-43	14-28	-

**Fonte:** Castro (2009).

O Quadro 1 mostra as faixas de variação de cada componente em função de diferentes tipos de matéria-prima. No Brasil, ainda há pouca produção com o bagaço de cana e palha de milho, sendo mais comum os dois primeiros tipos apresentados.

Além disso, conforme foi dito, as matérias primas do papel podem ser variáveis. Por se tratar de matéria prima renovável, o papel também pode ser produzido diretamente de papel já utilizado, ou seja, de papel reciclado. O único tipo de papel que não pode ser reutilizado é o papel para fins sanitários. Isso não significa que o papel para fins sanitários não possa ser produzido a partir de um material reciclável viável.

### **2.1.2. O mercado**

O mercado de produção de papel e celulose é crescente, e tende a ter seu consumo aumentado no Brasil, de acordo com as recentes estratégias de crescimento das empresas produtoras de papel e celulose.

No ramo especificamente da celulose, dado o contexto do Brasil, da extensão de plantações e do histórico em exportações, o país se apresenta em primeiro lugar na produção e exportação da celulose no mundo, com base em dados de 2020 (IBA, 2021; FAO, 2021). O

ranking dos países pode ser conferido no Quadro 2, que apresenta o Brasil em primeiro lugar, seguido pelo Canadá e Estados Unidos, sendo a produção do Brasil em torno do dobro da quantidade produzida no país em terceira posição.

**Quadro 2: Ranking dos maiores exportadores de celulose no mundo em 2020.**

<b>País</b>	<b>Produção (em 10<sup>6</sup> ton)</b>	<b>% de produção para exportação mundial</b>
<b>Brasil</b>	15,6	22,8%
<b>Canadá</b>	9,0	13,2%
<b>Estados Unidos</b>	7,8	11,5%
<b>Indonésia</b>	5,4	7,9%

**Fonte:** IBA (2021); FAO (2021).

O Brasil também se encontra entre a lista dos grandes produtores de papel no mundo. Em 2020, o Brasil ficou como o octogésimo maior país na produção de papel no mundo, segundo a IBA e FAO, responsável por 2,5% da produção mundial. Um ranking dessa classificação pode ser conferido no Quadro 3. O quadro apresenta a China em primeiro lugar ganhando disparadamente dos outros países da lista.

**Quadro 3: Ranking dos maiores produtores de papel no mundo em 2020.**

<b>País</b>	<b>Produção (em 10<sup>6</sup> ton)</b>	<b>% da produção de papel no mundo</b>
<b>China</b>	117,2	29,2%
<b>Estados Unidos</b>	66,2	16,5%
<b>Japão</b>	22,7	5,7%
<b>Alemanha</b>	21,3	5,0%
<b>Índia</b>	17,3	4,3%
<b>Coreia do Sul</b>	12,0	3,0%
<b>Indonésia</b>	12,0	3,0%
<b>Brasil</b>	10,2	2,5%
<b>Rússia</b>	9,5	2,4%

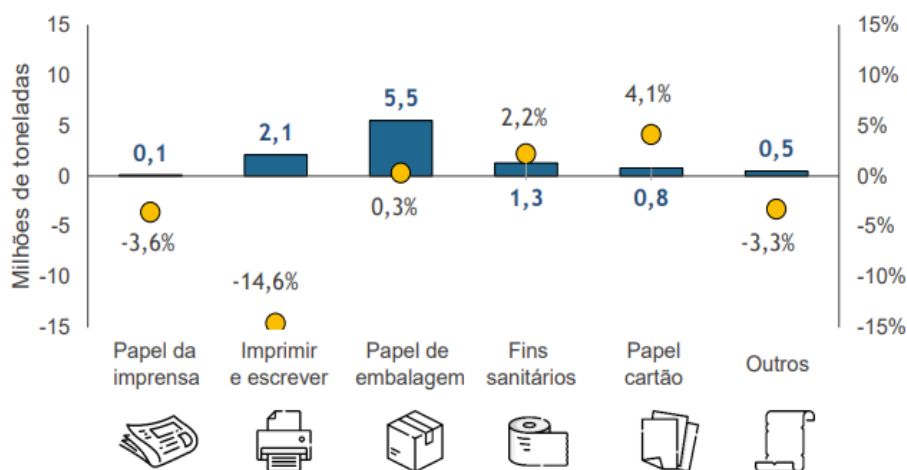
**Fonte:** IBA (2021); FAO (2021).

É importante entender que a celulose existe em grande quantidade para exportação e, no contexto brasileiro, em relação a desvalorização da moeda, é muito mais vantajoso fazer a exportação da celulose do que utilizá-la no país. Além do contexto histórico de ser um país de

exportação de produtos de base, ainda não existem indústrias que têm capacidade produtiva suficiente para transformar a celulose em produtos de utilização final.

Em relação aos produtos mencionados da indústria de papel e celulose, pode-se mencionar a parcela de produção por tipo de papel no país. Neste ponto, é possível notar as tendências de consumo de papel da população brasileira. Os dados em relação a produção de cada tipo de papel no Brasil estão representados na Figura 2.

**Figura 2: Produção por tipo de papel no Brasil em 2020 e variação em relação a 2019.**



**Fonte:** IBA (2021).

Pode-se notar pela Figura 2, que o consumo de papel da imprensa e de imprimir e escrever encontram-se em queda, conforme uma tendência mundial de que cada vez mais a população se torne tecnológica, diminuindo os usos destes dois setores de papel.

Um segundo fator importante de se notar é o crescimento dos outros tipos de papel. Como exemplo, tem-se o papel para embalagem, que teve um crescimento alto durante os últimos anos conforme pode ser visto na Figura 3, devido ao aumento de entregas de produtos e maior globalização. Um segundo fator que pesou no aumento de consumo de papel de embalagem foi a pandemia, com início em 2020, que acelerou o processo de entregas de produtos.

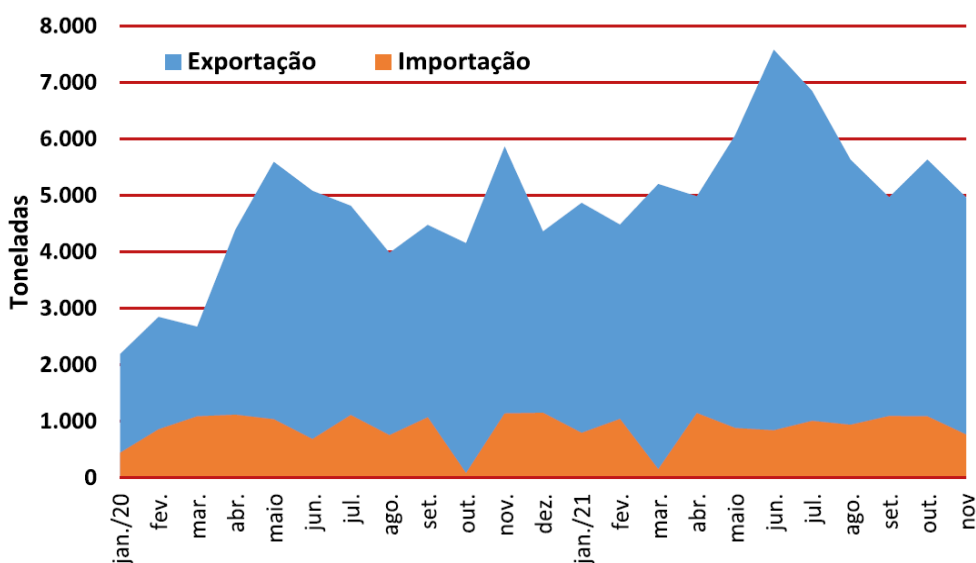
**Figura 3: Dados de expedição de papelão ondulado (papel de embalagem) em toneladas em médias trimestrais.**



Fonte: FGV IBRE (2022).

Para os papéis para fins sanitários, o crescimento do mercado é mais variável e não segue um padrão específico. Neste caso, as indústrias deste ramo focam no desenvolvimento do marketing para aumentar o consumo de papel por habitante, além do desenvolvimento de produtos que estimulem a maior compra dos produtos.

**Figura 4: Comércio de papéis para fins sanitários.**



Fonte: Revista O Papel (2022).

Essa variação dificulta o crescimento orgânico da categoria, e estimula estratégias das empresas. Como por exemplo: toalhas de papel com maior quantidade de folhas por embalagem, ou então redução da metragem do papel higiênico (rolos de 30 m, agora são de 20 m), tudo com uma estratégia de aumentar o mercado no país (Dados internos Softys Brasil, 2022), que já possui uma variação muito grande de produção, conforme pode-se notar pela Figura 4.

Um ponto interessante de se notar sobre o mercado de papel no Brasil, e o motivo das estratégias diferenciadas das indústrias do ramo, é que o consumo de papel no Brasil é de apenas 4 kg por habitante/ano, ao passo que em países mais desenvolvidos, o consumo varia entre 12 e 18 kg por habitante/ano (IBA / BRACELPA, 2022). Esse fator pesa na exportação de celulose ser maior do que a produção de papel no país, como resultado de um fator cultural.

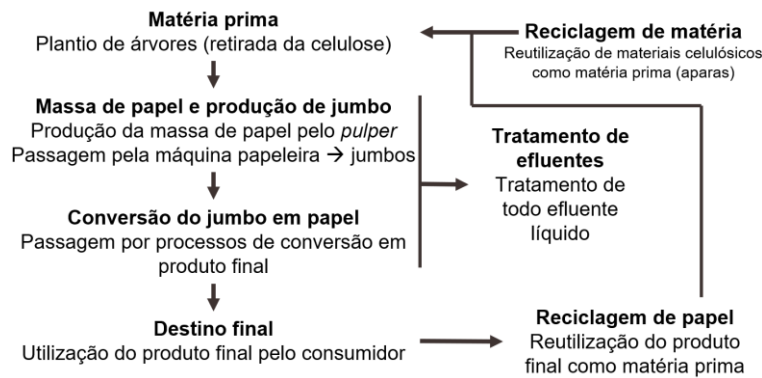
Sendo assim, é possível concluir que além das tendências orgânicas do mercado de consumo de papel, há ainda as indústrias produtoras do ramo, que estão atuando fortemente para aumentar o consumo de papel entre a população brasileira.

### **2.1.3. A indústria**

A indústria de papel também tende a fazer diversas integrações entre si, e se tornar cada vez mais uma indústria verticalizada. É uma indústria que tem pouco crescimento de novos competidores do ramo no Brasil. O crescimento da indústria se resume, praticamente, a aquisições, fazendo com que o mercado seja dominado por grandes empresas, não dando espaço para pequenas produções, que encarecem muito o processo.

A verticalização da indústria de papel consiste na união de todo o ciclo que engloba desde a matéria-prima, até a produção e consumo final, além da reciclagem dos materiais. Na Figura 5 é possível verificar um esquema de como esse ciclo pode acontecer no ramo de papel e papelão. É importante salientar que o presente trabalho busca se aprofundar na análise técnica da etapa de tratamento de efluentes.

**Figura 5: Ciclo de produção e verticalização da indústria de papel e celulose.**



**Fonte:** Autoria própria (2022).

No Brasil, as indústrias seguem esse mesmo padrão, com cada vez mais aquisições no ramo. Em 2018, duas das maiores aquisições do ramo aconteceram no país, sendo elas: a compra da Fibria pela Suzano, e a compra da SEPAC pela Softys, do grupo CMPC.

Além disso, as empresas multinacionais também vêm ganhando espaço no país e comprando/fazendo fusões com empresas locais, como é o caso da Eldorado que foi adquirida pela Paper Excellence, pertencente a um grupo indonésio.

Conforme essas fusões acontecem, maior a verticalização das indústrias presentes no mercado brasileiro, assim como a maior quantidade de produtos oferecidos pelas mesmas.

Como exemplo, temos a fusão mais recente, em 2022, da Carta Fabril com a Softys, que possibilita à Softys a venda de lenço umedecido com produção própria. Ainda, a Suzano e a Klabin estão em fase de expansão e análise de compra de indústrias menores de produção de papelão, ramo em que ainda não possuem grande vivência.

#### **2.1.4. Dados da indústria**

A indústria de papel e celulose é antiga, e com isso, existem muitos dados sobre a produção. Alguns números que chamam a atenção quando falamos dessa indústria são (DATASCOPE, 2019):

- Para produção de 1 tonelada de papel, são necessários aproximadamente 115.000 litros de água;
- Fabricar papel a partir de resíduos de papel economiza cerca de 85% da água usada na produção comum;

- A reciclagem de papel exige apenas 30% da energia elétrica e 70% da água que seria necessária para produção de papel a partir de madeira;
- A indústria utiliza cerca de 10 litros de água por folha de papel para o processamento apenas das matérias primas.

A partir desses dados, é possível notar que o uso de água na indústria é realmente relevante e muitas informações sobre as produções do ramo se baseiam nesse uso.

Um segundo ponto importante é que os efluentes desse uso de água em excesso do processo de fabricação do papel e celulose podem gerar poluição do tipo química, física, biológica e físico-química. Dentre estes, a poluição química é a maior responsável pelas emissões no meio ambiente, podendo ser advinda de diversas partes do processo, a serem definidas posteriormente neste estudo.

De forma geral, esse tipo de indústria deve ter um bom tratamento de seus efluentes, para que estes possam retornar à natureza, uma vez que são utilizados em grandes quantidades e sua reciclagem é de extrema importância. Todo lançamento de efluentes na natureza deve seguir algumas condições, como pH, temperatura e DBO em certas faixas aceitáveis, entre outras características que podem ser exigidas localmente.

## 2.2. A produção de papel

Conforme já discutido, o processo de produção do papel é baseado no princípio de fibras de plantas dissolvidas em água e então drenadas por uma tela, combinando uma forma que seria uma teia de fibras, formando assim, o papel.

Existem diferentes tipos de papéis que podem ser produzidos, como já citado anteriormente, para efeitos deste estudo, será focado apenas no papel formado pela pasta mecânica de celulose. Algumas características específicas da pasta mecânica podem ser verificadas pelo Quadro 4. O quadro apresenta características do produto final que a pasta gera, assim como os seus principais usos.

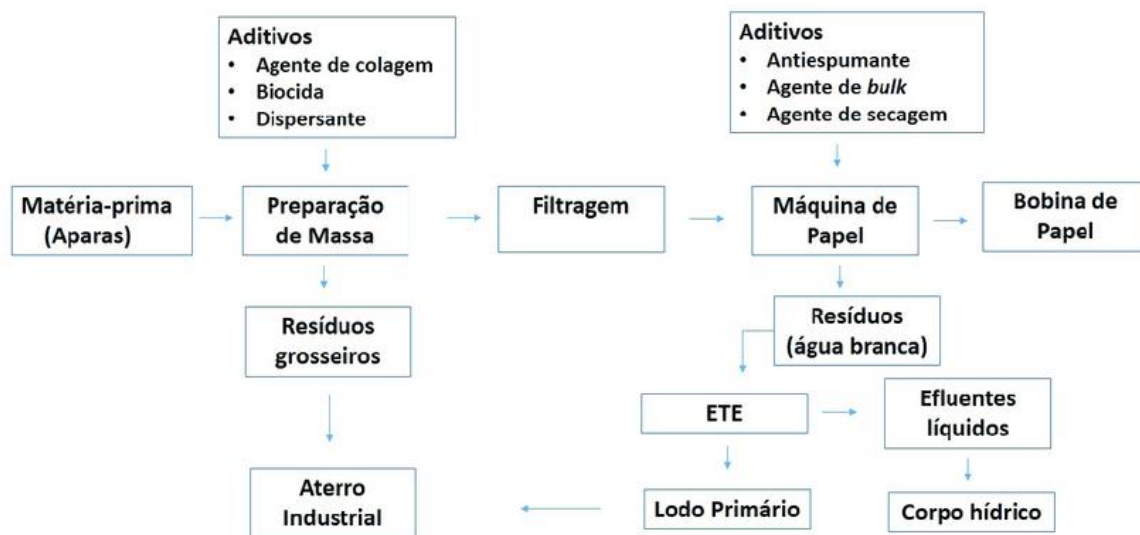
**Quadro 4: Características e usos da pasta mecânica de celulose.**

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Usos</b>
Pasta mecânica	Resistência física reduzida Baixo custo Boa capacidade de impressão Alta opacidade	Papel de jornal, catálogos, revistas, papéis de parede, papéis absorventes, papelão.

**Fonte:** Castro (2009).

O fluxograma básico da produção de papel pode ser representado pela Figura 6. É importante ressaltar que o fluxograma apresentado conta com aparas como matéria-prima, dessa forma, caso utilizado madeira como matéria-prima, o processo continua o mesmo, o que muda são os aditivos utilizados na preparação da massa, e alguns passos nessa preparação, como por exemplo, é necessário utilizar um moinho para triturar a madeira no estágio inicial, entre outros fatores.

**Figura 6: Fluxograma tradicional do processo de produção de papel de uma indústria em Santa Catarina.**

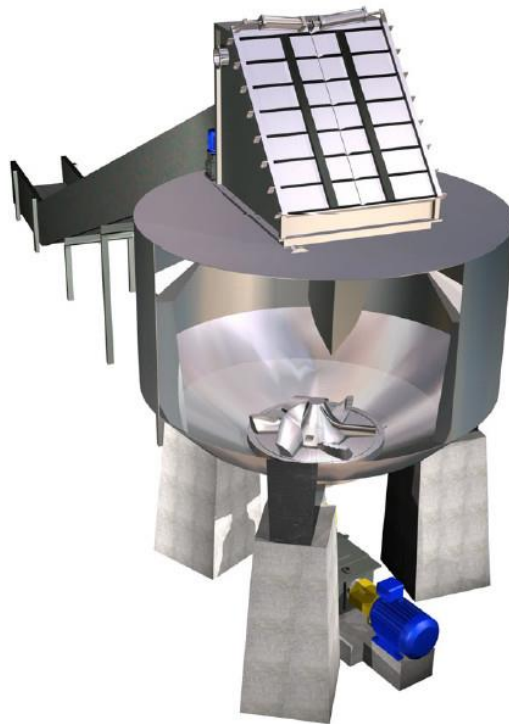


**Fonte:** Adaptado de Robert (2007); Pelisser (2018).

A preparação da massa celulósica é o primeiro passo para a fabricação de papel. Essa etapa consiste na fragmentação e posterior hidratação da matéria-prima inserida (que pode ser madeira, ou aparas, conforme já comentado). O processo acontece em um desagregador de fibras que possui um bater com rotor no centro, fazendo com que a massa celulósica se movimente até as fibras estarem individualizadas. Um desenho do equipamento responsável por esta etapa do processo pode ser conferido na Figura 7.



**Figura 7: Desagregador ou *pulper* para preparo de massa celulósica.**



**Fonte:** Oliveira (2016).

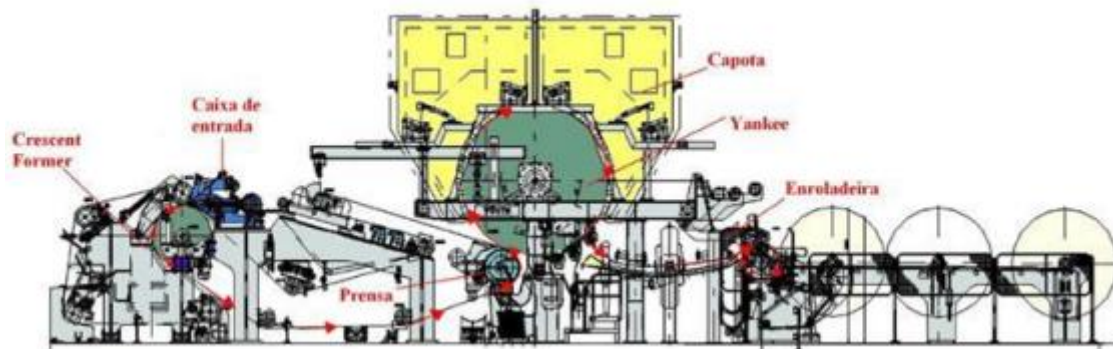
O ponto mais importante da fabricação de papel, e que também acumula o maior uso de água através da produção é a máquina papelreira, ou máquina de papel. A função básica desta etapa consiste em remover a água da folha, e isso é feito em três etapas: a formação, a prensagem e a secagem. Por fim, a máquina de papel ainda conta com uma enroladeira, conforme são apresentadas nas Figuras 8-a e 8-b.

**Figura 8-a: Máquina papelreira com as 4 funções básicas.**



**Fonte:** Adaptado de Campos (2012).

**Figura 8-b: Caminho do papel desde a formação até a enroladeira (Yankee representa a parte de secagem).**



**Fonte:** Adaptado de Campos (2012).

Cada uma dessas etapas consiste em uma função específica para a formação dos rolos de papel do tipo jumbo, que são rolos de papel grandes que saem direto da máquina papelreira, e seguem para a etapa de conversão de papel posteriormente (como por exemplo, conversão em papel higiênico, papel toalha, ou seguimento para a máquina onduladeira que dá origem ao papelão). Para se ter uma noção do que são jumbos, a Figura 9 apresenta um armazém deste material.

**Figura 9: Rolos de jumbos no armazém da empresa Carta Fabril no Rio de Janeiro.**



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A primeira etapa da máquina papelreira, que consiste essencialmente na formação do papel, utiliza a matéria prima, ou seja, a massa celulósica, que é bombeada para a mesa formadora de papel, e a partir do desaguamento, retirada da maior parte úmida da massa, é responsável pela formação uniforme do papel (SENA, 2011).

O segundo passo acontece após a mesa formadora de papel, no qual a mistura gerada na etapa anterior, passa por um conjunto de prensas. Essa etapa libera grande parte da água do processo, já que esta é removida a partir da porosidade do feltro utilizado na prensadora, e da pressão exercida pelos rolos (SENA, 2011).

Após a prensagem, o papel segue para um processo de secagem, que pode acontecer em uma parte do equipamento chamada de Yankee, que realiza esta etapa por meio da retirada de água da folha por compressão (CAMPOS, 2012), a retirada de umidade nesta etapa deixa o papel após esta etapa com 6 a 8% de umidade total, seguindo para a enroladeira (SENA, 2011).

O processo finaliza com a formação do jumbo, que consiste na rebobinadeira. Este acabamento realizado reorganiza o papel e ajusta o diâmetro para os valores desejados da folha a ser convertida posteriormente no produto final/produto acabado.

### **2.2.1. Produção de papel Tissue**

O papel do tipo Tissue concentra grandes novidades da indústria com máquinas extremamente sofisticadas. O papel Tissue tem grande uso em produtos de higiene, como em papéis higiênicos, toalhas de cozinha, guardanapos, entre outros.

O papel desta indústria deve ter alta absorção de energia, boa flexibilidade e boa absorção de líquidos. O papel Tissue conta com diversas medidas específicas que caracterizam esse papel, como a gramatura, a absorção, a espessura, a aparência e a maciez.

Essas características estão intimamente ligadas com o funcionamento da máquina papelreira, que rege a maior parte destes fatores, além da matéria prima que é utilizada na criação da massa que será utilizada durante o processo.

A produção do papel Tissue possui as mesmas etapas que a formação do papel comum, que gera o jumbo, apenas mudando as atividades após a formação do jumbo, como a parte de corte dos rolos menores. Com o jumbo formado, a indústria passa por uma etapa chamada de conversão, na qual o papel do jumbo é transformado em rolos menores, colocados ao redor do tubete de papelão, cortados e prensados para ficarem gofrados (a partir de rolos gofradores).

Como a indústria de papel Tissue possui um baixo valor agregado, é comum que as empresas procurem baratear o custo da matéria prima, utilizando aparas brancas na produção,

que são restos de materiais celulósicos (ANAP, 2018). As aparas são misturadas na massa celulósica utilizada para a produção do papel.

O uso de materiais celulósicos como as aparas é limitado por dois motivos: a falta de aparas no mercado, que vem normalmente da reciclagem de produtos de origem celulósica, ou pela exigência de maior qualidade no produto conforme a capacidade aquisitiva do consumidor. Isso porque o produto final gerado pelas aparas é de uma qualidade inferior àquele produto gerado através de celulose não reciclada.

Apesar dessas limitações, a produção com aparas barateia a produção. Por outro lado, o uso dessas aparas faz com que o efluente da produção seja menos puro. Isso ocorre porque as aparas possuem mais impurezas do que a madeira pura, e dessa forma, é necessária uma maior quantidade de água para retirar essas impurezas, além de deixar o efluente com mais compostos impuros.

Conforme mencionado anteriormente, a produção de papel é uma grande utilizadora de recursos hídricos. Dessa forma, é necessário o tratamento dessa água para que o efluente possa ser reutilizado. Esse efluente pode conter restos de celulose, cinzas entre outros poluentes.

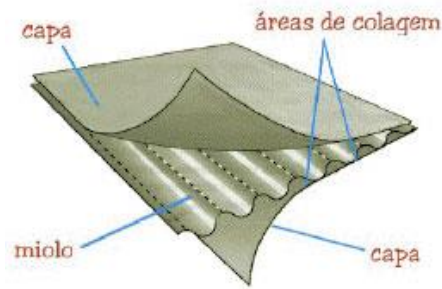
A grande maioria das empresas de papel Tissue vem substituindo a utilização de celulose pura, não reciclada, por aparas e outros materiais substitutos; e com a consequente redução de custos da matéria prima, investindo no melhor tratamento de efluentes que as aparas geram (Dados internos Softys Brasil, 2022).

Esse tratamento ainda é novo para a indústria e muitas ainda terceirizam esse tratamento, dado que não existem muitos estudos sobre o melhor tratamento dado ao efluente desta indústria em específico, o que acaba encarecendo o uso, e prejudicando uma futura reutilização de materiais de origem celulósica.

### **2.2.2. Produção de papelão**

O papelão ondulado é a estrutura formada por um ou mais elementos ondulados, chamados miolos, que estão fixados a um ou mais elementos planos, chamados capas, por meio de adesivo ou cola, aplicado no topo das ondas. Um esquema de como é formado um papelão pode ser visualizado na Figura 10.

**Figura 10: Esquema da estrutura de um papelão.**



**Fonte:** Recicloteca (2003).

Tanto o “miolo” quanto a “capa” são obtidos da mesma forma que o papel comum, havendo apenas algumas diferenças entre as exigências para cada camada. No Brasil, o uso de papel reciclado na produção do papelão ondulado chega a mais de 86% do total produzido.

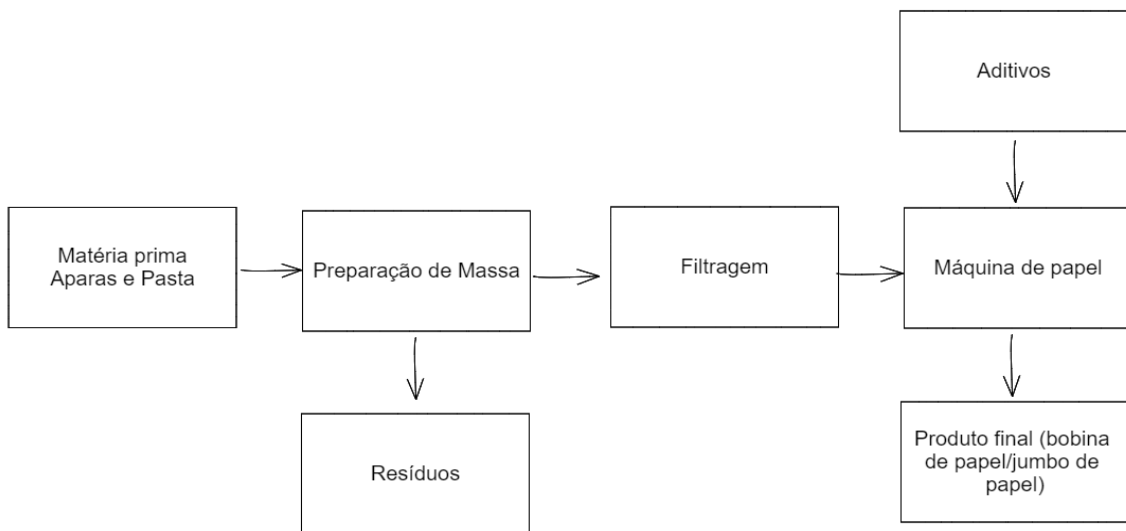
O papel do tipo “miolo” é usado para ser ondulado, conforme apresentado, este deve apresentar resistência e bom custo benefício. Para produção do miolo (o papel ondulado), o papel selecionado passa por um processo de amaciamento realizado por meio de vapor de água. Em seguida, ele é introduzido em um par de cilindros dentados, chamados de corrugadores, onde são formadas as ondas.

Já os papéis do tipo “capa” são usados para embalagens que exigem maior resistência e bom acabamento. Valorizando a qualidade do produto com melhor proteção e o aspecto para sua embalagem.

Na composição do papelão ainda podem participar o papel WTL, mais utilizado em embalagens alimentícias, medicamentos e cosméticos, além do papel Off Sett, que é um papel 100% branqueado para oferecer maior qualidade ao produto final de papelão.

O processo de formação de cada tipo de papel para as diferentes camadas, são produzidos pela mesma lógica do papel comum, já apresentado anteriormente, apenas com a diferença na montagem do produto final, conforme apresentado na Figura 11.

**Figura 11: Fluxograma simplificado do processo de produção do papel.**



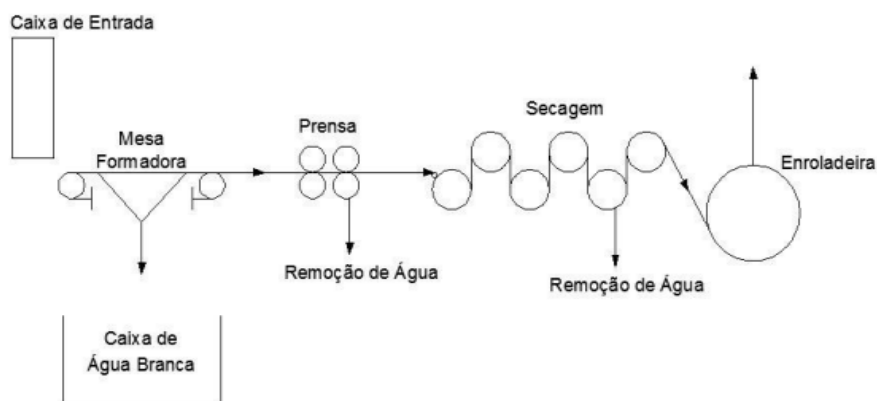
**Fonte:** Adaptado de Sousa et al. (2018).

Conforme a demanda de papelão é crescente, a produção pode tender a ser ainda menos seletiva durante o processamento da matéria prima.

### 2.3. Tratamento de efluentes

Conforme já discutido, o processo de formação do papel utiliza muita água. Durante a passagem do papel pela máquina papelreira, pode-se notar a maior quantidade de água usada no processo. Na Figura 12, pode-se ver o processo simplificado, que identifica as etapas em que a água sai do processo.

**Figura 12: Processo de remoção de água por cilindros durante a passagem do papel pela máquina papelreira.**



**Fonte:** Dolny (2011).

Além disso, é possível identificar a quantidade de água que sai do processo em cada etapa, conforme mostrado no Quadro 5.

**Quadro 5: Eliminação de água nas três principais seções da máquina papelreira.**

Zona	Conteúdo de seco na entrada	Conteúdo de seco na saída	Percentagem de água eliminada
I - Formação	1%	18%	95,4%
II - Prensagem	18%	42%	3,2%
III - Secagem	42%	94%	1,4%

**Fonte:** Adaptado de Campos (2012).

O efluente que sai do processo de fabricação gera bastante poluição do tipo química, em especial, conforme já demonstrado. Algumas características deste efluente podem ser vistas no Quadro 6.

**Quadro 6: Características do efluente de uma indústria de papel e papelão.**

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
<b>pH</b>	6,2	7,0	6,7	0,2
<b>DQO total (mg/L)</b>	982	3725	1801	770
<b>DQO solúvel (mg/L)</b>	274	1625	1055	376
<b>Carboidrato total (mg/L)</b>	45,6	549,5	200,0	159,3
<b>Proteínas (mg/L)</b>	38,2	158,8	91,7	34,6
<b>TSS (mg/L)</b>	148	3479	1004	769
<b>VSS (mg/L)</b>	72	1393	488	393
<b>Acetatos (mg/L)</b>	16,2	293,0	161,1	111,7
<b>Lactatos (mg/L)</b>	0,0	303,3	132,3	122,7
<b>TKN (mg/L)</b>	6,1	25,4	14,7	5,5

**Fonte:** Adaptado de Tawfik et al. (2021).

O Quadro 6 apresentado é referente a um estudo com os efluentes de uma indústria de papel e papelão situada no Egito (*New org El-Arab City*). Neste caso, foi implementado um tratamento biológico, dado que a DQO solúvel representa a maior parte dos orgânicos, sugerindo uma boa aplicabilidade deste método (CHINNARAJ e VENKOBA RAO, 2006). Além disso, a cor da água coletada costuma ser marrom escura e bastante turva. A presença de

carboidratos e de proteínas também indica uma boa geração de gás metano (BONK et al., 2015).

#### **2.4. Legislação**

Além do aspecto puramente ambiental, que considera apenas o bem estar do ambiente, é importante salientar que existem certos padrões que o despejo de efluentes industriais devem ser seguidos antes de serem descartados no meio ambiente.

Segundo a norma brasileira da ABNT – NBR 9800/1987, pode-se definir os efluentes industriais como: “despejos líquidos provenientes das áreas de processamento industrial, isso inclui os que têm origem nos processos de produção, as águas de lavagem de operação de limpeza e outras fonte, que apresentem poluição por produtos utilizados ou produzidos no estabelecimento industrial”.

O órgão consultivo e deliberativo sobre o despejo de efluentes no meio ambiente é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (o CONAMA), e quem executa as regulamentações necessárias são: o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (o IBAMA), e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (o Instituto Chico Mendes).

Segundo a Lei 6.939/1981, são estabelecidos os deveres de cada órgão para garantir o bem estar do Meio Ambiente. Esta lei, estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, constituindo por fim, o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama).

A lei menciona, que ainda se encontra em vigor determina ainda que serviços pelos quais o IBAMA pode ser procurado a fim de fazer com que a indústria esteja dentro dos padrões corretos e aceitáveis segundo a Política Nacional do Meio Ambiente. Ainda, dentro desta lei, existe uma classificação dos efluentes gerados por diferentes indústrias, e é possível notar que o efluente gerado pela indústria de papel é considerado como alto em potencial poluidor e em grau de utilização de recursos naturais, ressaltando ainda mais a necessidade das indústrias de papel de tratarem seus efluentes.

A Resolução CONAMA número 357 de 2005, dispõe sobre: “a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”. É possível, por meio deste texto, ter os parâmetros necessários em relação à qualidade do efluente a ser despejado em função do tipo de corpo de água que o recurso vai ser devolvido (como água



doce, águas salinas e águas salobras). Por esse motivo, a resolução deve ser consultada em cada caso específico.

Como exemplo prático, são apresentadas algumas condições que devem ser seguidas no caso de despejo em águas doces:

- Turbidez até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT);
- DBO 5 dias a 20°C até 3 mg/L O<sub>2</sub>;
- pH: 6,0 a 9,0.

### **3. METODOLOGIA**

Face ao exposto anteriormente, é possível verificar uma necessidade de verificação analítica sobre a aplicação de tratamento de efluentes na indústria em questão.

Além disso, a análise do mercado de papel e celulose leva à principal tendência atual, que implica na verticalização estratégica da indústria. O estudo da verticalização de alguns grandes concorrentes do mercado, viabiliza a metodologia de análise da integração entre a indústria de papelão e de papel Tissue.

A integração vertical é uma decisão que, a médio e longo prazos, visa diminuir custos e obter qualidade em relação à distribuição da cadeia de fornecimento a partir da designação da produção própria e obtenção de insumos terceirizados. A decisão de fazer ou comprar define como se comporta a perspectiva estratégica e operacional da cadeia de suprimentos (FIGUEIREDO et al., 2016).

Além da cadeia vertical, é cada vez mais comum que uma mesma indústria seja capaz de produzir mais de um tipo de destinação final para o papel, como a *Jordan Paper and Cardboard Factories* (JPCF) e a Suzano, que é uma indústria brasileira, verticalizada e que possui uma ampla gama de produtos.

O presente trabalho conta com uma pesquisa bibliográfica por meios de tratamento e eficiência das plantas de produção de papel e dos efluentes líquidos gerados das plantas, conta-se com estudos de indústrias específicas em cada um dos diferentes tratamentos avaliados, que serão avaliados de acordo com a eficiência e custo benefício do mesmo.

#### **3.1. Integração da indústria de papel e celulose**

Poucas indústrias brasileiras se concentram na ampliação de seu portfólio por meio do aumento da diversidade de produtos atualmente. É um desafio atual fazer com que a produção de papelão, que utiliza matéria prima reciclada, seja conectada com a produção de papel Tissue com baixa qualidade, a qual usa também uma matéria prima que pode ser reciclada, conforme já foi visto anteriormente.

Um bom exemplo sobre a integralização e verticalização das indústrias do ramo é a Suzano. Esta é uma indústria que concentra grande esforço no aumento de seu portfólio e na sua própria verticalização, dominando desde o mercado de celulose pura, até a produção de papel e papelão, assim como a própria reciclagem de material acabado e dos efluentes da planta.

A preocupação da empresa é com o crescimento sustentável, colaborando com o meio ambiente, por isso, a empresa conta ainda com um relatório anual com um capítulo à parte apenas para a utilização de água durante a jornada de produção.

Algumas outras indústrias também possuem a integralização da sua reciclagem e do seu próprio tratamento de efluentes. O estudo do presente trabalho se baseou, além do estudo de possíveis tratamentos de efluentes disponíveis e eficientes para o ramo, em alguns estudos de caso sobre algumas indústrias integradas com suas ETEs.

São elas:

- Ripasa: ETE vinculada com a planta de Americana/Limeira, em São Paulo (FONSECA et al., 2003).
- Santher: ETE vinculada com a planta de Governado Valadares em Minas Gerais (BRANDÃO, 2014).
- Adami: ETE vinculada com a planta de Caçador, em Santa Catarina (TILHA et al., 2019).
- Rigesa: ETE vinculada com a planta de Valinhos, em São Paulo, atualmente a planta está desligada (FONSECA et al., 2003).

O estudo também conta com uma avaliação técnica da aplicação de alguns equipamentos que compõem o tratamento de efluentes, além de uma breve avaliação econômica sobre os gastos de uma configuração determinada de estação de tratamento de efluentes.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo tem como objetivo apresentar de forma geral quais são os tipos de tratamento disponíveis para o efluente da indústria de papel e papelão, além de discutir qualitativamente qual o papel e a eficiência de cada um dos tratamentos mencionados.

Por fim, o capítulo visa discutir o custo de implementação dos tratamentos apresentados para aqueles que fazem sentido ter uma análise técnica sobre sua implementação de forma mais profunda.

### **4.1. Tratamento de efluente da indústria de papel e celulose**

Na indústria de celulose e papel, as características dos efluentes gerados variam de acordo com o tipo de processo produtivo, tipo de madeira utilizada, tecnologia aplicada, práticas de gerenciamento, recirculação de águas residuárias e utilização total de água no processo (POKHREL e VIRAGHAVAN, 2004).

Conforme já comentado, o montante de água utilizado está diretamente relacionado com a geração, assim como com a emissão de efluentes. Apesar disso, a maior parte da poluição que é gerada está mais ligada com operação da fábrica e com o grau de fechamento de circuitos que estão incluídos no processo industrial (SPRINGER et. al, 2000).

Os efluentes da fabricação de papel em fábricas que não possuem integração entre a produção de celulose e de papel são mais limpos do que aqueles que saem de fábricas que possuem a produção de celulose e de papel na mesma planta. Nas indústrias que possuem a produção de papel e de celulose na planta, ocorrem as etapas mais críticas para a produção da celulose, matéria-prima básica da indústria do papel: o cozimento com produtos químicos, com o intuito de separar a celulose da lignina e demais componentes vegetais; e o branqueamento da celulose, processo que envolve várias lavagens para retirar impurezas e clarear a pasta que será usada para fazer o papel. As duas partes comentadas são as etapas que geram efluentes com características ácidas. Além da característica ácida, essas etapas caracterizam o efluente com alta DQO, alta quantidade de sólidos dissolvidos e cloro (FONSECA et al., 2003), conforme já demonstrado pelo Quadro 6.

Uma indústria de papel que não possui a integração entre a produção de papel e celulose, normalmente conta com efluentes que possuem restos de fibras que sobram dos processos em andamento, além da presença de aparas, como já comentado, e sobras da pasta mecânica que também fazem parte do processo da própria fábrica. Todos estes componentes

que se perdem durante o processo podem gerar malefícios do lado econômico para as indústrias. Para que isso seja reduzido ao máximo, as fibras que se encontram nos efluentes são resgatadas a partir de tratamento primário (ou seja, por meio de flotores e decantadores). Essas fibras podem então seguir para a fabricação de papéis com menor valor agregado, como papelão, Tissue de baixa qualidade, caixa de ovos, ou então, as fibras podem ainda ser comercializadas para serem utilizadas como matéria prima em processo de outras indústrias para este fim (ALMEIDA e VIDAL, 2008).

Conforme apresentado pela Figura 12, as fases de prensagem e de secagem do processo de produção do papel gera um efluente que pode ser chamado de água branca. Esse efluente em específico apresenta características como: 700 a 1400 mg/L de DBO e 1900 a 3200 mg/L de DQO, que são valores altos para efluentes de indústrias. Além disso, esse efluente é rico em fibras celulósicas, em cetona, resíduos de cola, agentes branqueadores, alguns corantes e amido (LACORTE et al., 2003). A título de comparação, o esgoto sanitário apresenta uma DBO de 220 mg/L e DQO em torno de 3 vezes esse valor, o que ressalta a importância do tratamento dessas águas residuárias (CETESB, 2009)

Como durante o processo produtivo do papel, o consumo de água é alto, as águas efluentes do processo são bastante diluídas e, conforme a gramatura do papel (mais fino ou mais grosso), é utilizada mais ou menos água no processo, salientando ainda mais o consumo de água. Para produções com papéis mais finos, com menor gramatura, é necessária mais água no processo para que se chegue na gramatura desejada, e dessa forma, aumentando ainda mais a diluição das águas residuárias (FONSECA et al., 2003). Durante a produção de papel do tipo Tissue, o consumo de água se torna maior por conta de a classe de papel ser mais fina do que a requerida do papelão, ou seja, o papel a ser produzido possui menor gramatura. Por outro lado, a produção de papelão requer mais água no início do processo. Isso ocorre porque no início do processo do papelão é necessário tratar a matéria prima, e esta possui mais impurezas do que a matéria prima utilizada no papel Tissue por ter menor qualidade (FONSECA et al., 2003).

O processo de tratamento de efluentes, em geral, necessita tanto de energia química, quanto de nutrientes que são utilizados para fazer a síntese dos compostos celulares, assim como da manutenção das células. Isso ocorre principalmente porque os sistemas de tratamento das águas residuárias contam com o crescimento de microrganismos, que exigem energia e nutrientes, por se tratar de um processo dinâmico (BRANDÃO, 2014).

O tipo de indústria em questão, de papel e celulose, normalmente opera com adição de fósforo (P) e nitrogênio (N) ao efluente. As indústrias seguem esse procedimento para que haja

uma maior eficácia durante o tratamento de efluentes. A quantidade de matéria orgânica presente no efluente é justamente o ponto de referência utilizado para o cálculo da relação de nitrogênio e fósforo necessário no processo (CETESB, 2009).

O fósforo constitui-se em um dos fundamentais nutrientes para os processos biológicos, ou seja, é um dos denominados macronutrientes, por ser demandado também em grandes quantidades pelas células. Nos processos de tratamentos aeróbios, uma relação DBO:N:P mínima de 100:5:1 é exigida (CETESB, 2009). Alguns efluentes industriais apresentam concentrações muito baixas de N e P, sendo necessária a adição desses nutrientes para proporcionar aumento na atividade microbiana, como é o caso das produções de papel e papelão, conforme já comentado.

Ainda por ser nutriente para processos biológicos, o excesso de nitrogênio e fósforo em efluentes industriais pode gerar eutrofização das águas naturais. Isso porque quando as descargas de nutrientes são muito fortes, pode-se gerar o florescimento muito intenso de gêneros que predominam em cada situação. Esse crescimento em excesso pode gerar malefícios para os usuários das águas de despejo, podendo ainda causar problemas no abastecimento de águas, como no caso de crescimento exacerbado de algas no local.

As relações DQO/DBO ou DBO/DQO são fatores e características importantes de um efluente, já que essa relação demonstra em partes o grau de biodegradabilidade de um efluente que deve ser despejado no meio ambiente ou reutilizado em algum processo.

A DQO e DBO apresentam valores próximos apenas em efluentes que possuem apenas poluentes biodegradáveis. Para efluentes que possuem teores de poluentes não-biodegradáveis, a diferença entre DQO e DBO se acentua (DEZOTTI, 2008). A relação DQO/DBO menor do que 2,5 indica que o despejo pode potencialmente ser tratado por processos biológicos (VON SPERLING, 2005) e, valores muito elevados na relação DQO/DBO, acima de 8, são indicativos de despejos industriais menos facilmente biodegradáveis (JORDÃO e PESSÔA, 2009). Na indústria de celulose e papel, a razão DQO/DBO está na faixa de 3 a 5 (DEZOTTI, 2008). Sendo assim, o efluente da indústria de papel e celulose não é o efluente mais facilmente tratável por este método, porém, ainda apresenta bons resultados.

Quanto mais a relação DBO/DQO se aproximar de unidade, mais se torna fácil tratar o efluente de forma biológica (METCALF e EDDY, 2003). Quando a relação entre estes dois parâmetros se torna menor do que 0,3, o tratamento biológico deixa de ser eficiente. Isso ocorre porque essa relação baixa entre eles representa que pode existir produtos orgânicos resistentes à degradação ou ainda, pode-se ter a presença de produtos tóxicos aos microrganismos (METCALF e EDDY, 2003).

Lagoas aeradas e sistemas de lodo ativado são os tipos de tratamento de efluentes que são mais utilizados dentro da indústria em estudo. Em geral, são bastante utilizados tratamento biológicos como estes apresentados, já que são bastante eficientes na remoção da matéria orgânica biodegradável. Entretanto, estes tipos de tratamento são limitados em relação a remoção de matéria orgânica recalcitrante (ARAUJO et al., 2009).

A eficiência de unidades de tratamento de águas residuárias pode estar relacionada com diversos fatores diferentes. Estes podem estar relacionados com as operações e com os processos do próprio tratamento em operação. É possível observar isso, por exemplo, para a eficácia de remoção de partículas em decantadores. Esta é dependente da relação entre: velocidade de sedimentação das partículas e taxa de escoamento superficial do efluente.

Já para processos químicos a eficiência, de forma geral, pode depender das propriedades químicas dos reagentes, das características físico-químicas do efluente, do tempo de reação considerado e das características dos produtos a serem formados. Para os processos biológicos, a eficiência pode ser vista da mesma forma, já que vai de acordo com a natureza e composição dos substratos presentes no afluente, das características e concentração da biomassa presente nos reatores, das condições ambientais tais como: pH, temperatura, presença de nutrientes, tempo de contato entre substrato e biomassa e dos fenômenos que regem o transporte de substrato às células (VON SPERLING, 2005).

Para se obter os parâmetros que são utilizados para os dimensionamentos necessários das estações de tratamento de efluentes, são utilizadas pesquisas experimentais, em geral essas são realizadas em tamanho de laboratório, ou seja, em escala piloto e protótipos. Podem ainda ser utilizados, com menor frequência e em estágios mais avançados das pesquisas, experiências em escala real.

#### **4.1.1. Tratamento em ETE comum de planta de papel e celulose**

O tratamento realizado em Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) pode ser considerado como o tipo de tratamento mais comum.

De forma geral, as fábricas que atuam com ETEs, possuem estações de pré-tratamento para seus efluentes principais. Neste pré-tratamento, são removidos areia, detritos, cinzas inorgânicas, pedregulhos e outros materiais que podem estar presentes.

Essa primeira etapa é composta por:

- Tanque de sedimentação: no qual a decantação dos materiais é feita em grandes tanques de formato retangular. Neste caso, os materiais mais pesados, vão se depositando ao

fundo do tanque por ação da gravidade, e ficando na zona de repouso, que forma parte do lodo gerado.

- Sistema de peneiramento: são empregadas peneiras com aberturas diferentes, que fazem a seleção do material que deve sair e ficar a partir do tamanho das partículas. Isso pode ocorrer por meio de peneiras vibratórias, peneiras de tambor entre outras.

Uma segunda etapa do pré-tratamento é a correção do pH. Caso o pH do efluente esteja fora da faixa básica (pH entre 6 e 9) (FONSECA et al., 2003), devem ser tomadas ações corretivas para que o efluente se enquadre nessa faixa.

Além do pH também podem ser tomadas ações em relação à temperatura do efluente. Se o mesmo estiver em temperaturas acima de 40°C (FONSECA et al., 2003), o tratamento pode não ser tão efetivo e, portanto, o resfriamento é necessário através de torres de resfriamento, tanques com aspersores entre outros. Esse tratamento da temperatura ocorre por conta da ação biológica que ocorre durante o tratamento dos efluentes. Isso porque o balanço calorífico para um bom funcionamento entre os microrganismos e o tratamento eficiente é dependente das temperaturas do efluente e do ambiente.

Depois desse pré-tratamento, no qual o efluente sai já com as condições necessárias para o restante do tratamento, passa-se para o chamado tratamento primário. Este tratamento denominado primário se baseia na remoção de sólidos que se encontram em suspensão no meio líquido.

No caso da indústria de papel e papelão, o efluente pode possuir uma grande quantidade de matéria coloidal, assim como substâncias químicas que podem estar dispersas e, que podem atrapalhar a sedimentação que ocorre por ação da gravidade. Por isso, a floculação é bastante utilizada para condicionar os despejos industriais antes da decantação primária.

Por isso, o efluente vai para uma estação de clarificação da água, a partir da decantação gravitacional ou da flotação com ar dissolvido, que formam microbolhas que facilitam a ascensão dos flocos, e facilitam a remoção, para só então seguir para a sedimentação primária.

Conforme já comentado, a sedimentação denominada primária por sua vez, é empregada para remoção de sólidos do meio líquido. Essa etapa pode ser realizada por bacias de sedimentação, que podem estar localizadas diretamente no terreno ou em decantadores mecanizados. Os decantadores mais utilizados são os mecanizados de formato circular. Isso porque o tempo de decantação é de 3 a 4 horas, enquanto o de bacias em terrenos é de 12 horas.

Depois disso, o efluente segue para o tratamento secundário. Nesta etapa, o principal objetivo se torna reduzir a DBO solúvel no líquido, por meio de processos de oxidação biológica. Para que este tratamento aconteça corretamente, é necessário que no início do



processo sejam adicionados nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Isso porque, como comentado anteriormente, o efluente da indústria de papel e papelão é deficiente em nutrientes essenciais para que haja equilíbrio dos organismos biológicos que são necessários durante a oxidação e a estabilização da matéria orgânica presente no efluente.

Os tipos de tratamento mais utilizados pelas indústrias de papel e papelão, são: lagoas de estabilização, lodos ativados e filtros biológicos.

#### **4.1.1.1. Tratamento em lagoa de estabilização**

As Lagoas de Estabilização servem tanto para regularizar as descargas no corpo receptor como também, para reduzir a carga de DBO. Ou seja, este tipo de tratamento é eficiente na remoção da matéria orgânica biodegradável (removendo facilmente mais de 90% da DBO).

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico em que a estabilização da matéria orgânica é realizada pela oxidação bacteriológica (oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia) e/ou redução fotossintética das algas.

Entretanto, alguns contaminantes do efluente da indústria de papel e papelão, como os compostos lignínicos e seus derivados, persistem devido à sua recalcitrância. Os mesmos acabam atribuindo cor e toxicidade ao efluente mesmo após o tratamento (XAVIER et al., 2011).

A redução dessas condições de cor, toxicidade e compostos recalcitantes, podem ser resolvidas através do tratamento com processos físico-químicos, adsorção ou oxidação, entre outros.

Alguns dos principais pontos positivos da utilização de lagoas de estabilização são:

- São favoráveis ao tratamento do efluente líquido da indústria;
- elevada eficiência na remoção de DBO e coliformes;
- segurança na eficiência;
- flexibilidade e simplicidade operacional;
- pequeno investimento e baixo custo operacional.

Já como ponto negativo, o principal é a necessidade extensão de terra para implementação das lagoas, além da possibilidade de liberação de maus odores no ambiente.

As lagoas de estabilização possuem algumas classificações de acordo com seu funcionamento, que está descrito a seguir:

- **Lagoa anaeróbia:** A lagoa anaeróbia não apresenta oxigênio dissolvido abaixo da superfície da água, e esse é seu principal diferencial entre as lagoas de estabilização. Dentro deste tipo de lagoa, o processo ocorre, com a ausência de oxigênio na água, bactérias conseguem se desenvolver no ambiente, e assim, transformar a poluição orgânica em metano. Para que esse processo ocorra, acontecem duas etapas: a primeira delas é a liquefação e formação de ácidos através das bactérias acidogênicas, enquanto a segunda é em relação a formação de metano através das bactérias metanogênicas. Primeiramente, acontece a conversão da matéria orgânica complexa em matéria orgânica com formato mais simples, ainda sem conversão para metano (liquefação). Para a segunda fase, a DBO passa a ser removida, com os ácidos que foram produzidos na etapa de liquefação, sendo convertida a metano, gás carbônico e água. O modo pelo qual o carbono que é removido através dessas matérias orgânicas está ligado ao fato de que o metano sai do meio líquido para a atmosfera, dado que se trata de um gás. Para um bom funcionamento deste tipo de lagoa de estabilização, devem ser considerados o controle em específico de três fatores: ausência de oxigênio dissolvido (isso porque as bactérias metanogênicas que devem estar envolvidas nesse processo são do tipo anaeróbias estritas, isso significa que estas não tem capacidade de sobreviver na presença de oxigênio); temperatura (a qual deve estar acima de 15°C); e pH (o qual deve estar entre 7,0 e 9,0). Possíveis alterações em cada um dos parâmetros, que saiam para fora da faixa e valores indicados, podem afetar diretamente a redução de eficiência de remoção de matéria orgânica.
- **Lagoa facultativa:** A lagoa facultativa é o tipo mais simples de lagoa de estabilização que se pode ter em termos de operação da lagoa. A lagoa facultativa consiste na retenção do esgoto por um período, ao longo do qual seja suficiente que os processos de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam. Esse tipo de lagoa conta com reações lentas, com longos períodos de duração. Por esse motivo, as lagoas anaeróbias requerem grandes áreas para suas construções, a fim de captar todo o volume necessário e ainda respeitar o tempo de retenção necessário. Para este tipo de lagoa, é necessário monitorar e controlar: temperatura e pH, pois a atividade biológica está relacionada diretamente com estes fatores. A lagoa facultativa conta com três diferentes zonas, são elas: zona anaeróbia (na qual a matéria orgânica em suspensão, que é a DBO particulada, tende a sedimentar, essa é a zona que dá origem ao lodo no fundo da lagoa); zona aeróbia (matéria orgânica dissolvida, que é a DBO solúvel, a qual não se sedimenta, permanecendo dispersa no meio líquido, próxima a superfície); e por fim, a zona

facultativa (a qual conta com a presença de bactérias anaeróbias e aeróbias responsáveis pela estabilização da matéria orgânica).

- **Lagoa aeróbia:** Nas lagoas aeróbias, a principal característica, como o nome já diz, são os equipamentos de aeração que devem ser utilizados no processo. São necessários aeradores superficiais que tem como função o fornecimento de oxigênio para o meio líquido. A forma de funcionamento destes equipamentos é que estes são capazes de gerar turbulências no meio líquido, fazendo com que o oxigênio do meio ambiente, contido na atmosfera, possa adentrar o meio líquido. Uma outra função destes equipamentos é aumentar a eficiência da lagoa, isso é feito uma vez que os equipamentos promovem a mistura entre microrganismos (DBO) e sólidos em suspensão (biomassa). A lagoa aeróbia apresenta uma boa remoção de matéria orgânica, porém, não possui capacidade de separar a biomassa, que se encontra presente em suspensão ao longo do volume da lagoa. Sendo assim, é altamente recomendado que uma unidade de decantação (podendo ser uma lagoa de decantação) seja colocada após a saída a lagoa aeróbia para que os sólidos em suspensão possam se sedimentar.
- **Lagoa de maturação:** A lagoa de maturação por sua vez é responsável principalmente pela remoção de bactérias, coliformes, vírus e ovos de helmintos. A lagoa de maturação faz com que o efluente das outras lagoas já apresentadas possa ser mais maturado antes do despejo, ou antes de outros pós-tratamentos. Em geral, a lagoa de maturação remove patógenos, e não DBO, sendo opções alternativas bastante econômicas em relação à desinfecção do efluente. As lagoas de maturação podem remover em até 99,99% de coliformes. Essa remoção pode ser afetada por algumas coisas, como: temperatura, pH, organismos predadores, sedimentação, entre outros. Alguns destes mecanismos se tornam mais efetivos com menores profundidades da lagoa, o que pode ocasionar em construções de lagoas mais rasas, comparadas aos demais tipos de lagoas. Por conta da profundidade menor, ocorre a elevação do pH, por conta da atividade fotossintética, assim como aumento da concentração de oxigênio dissolvido. Esses fatores são afetados devido à alta penetração da radiação solar.

#### **4.1.1.2. Tratamento por lodo ativado**

O sistema de lodos ativados é usado em grande escala, para o tratamento de águas residuárias, domésticas e industriais, em situações em que uma elevada qualidade do efluente é indispensável e a disponibilidade de área é reduzida. Todavia, pelo fato de ser implantada

uma mecanização superior à de outros sistemas de tratamento, a manutenção e operação do mesmo são mais complexas. Outras desvantagens são o consumo de energia elétrica para aeração e a maior produção de lodo.

O sistema de tratamento por lodo ativado consiste na aceleração do processo de oxidação e decomposição biológica da matéria orgânica dissolvida nos esgotos através do aumento considerável da população microbiológica em tanque de oxidação ou reator biológico.

Para Giordano (2004), o processo é fundamentado no fornecimento de oxigênio (ar atmosférico ou oxigênio puro), para que os microrganismos biodegradem a matéria orgânica que se encontra dissolvida e em suspensão, transformando-a em gás carbônico, água e flocos biológicos formados por microrganismos característicos do processo.

Esta característica é utilizada para a separação da biomassa (flocos biológicos) dos efluentes tratados (fase líquida). Os flocos biológicos formados apresentam normalmente boa sedimentabilidade.

De acordo com Von Sperling (2002), os seguintes itens são partes integrantes e a essência de qualquer sistema de lodos ativados de fluxo contínuo: tanque de aeração (reator); tanque de sedimentação (decantador secundário); recirculação de lodo; retirada de lodo excedente.

O sistema de lodos ativados apresenta como vantagens: qualidade muito boa do efluente final, boa flexibilidade das operações, volumes de reatores pequenos, maior segurança e estabilidade do processo de tratamento.

Já as desvantagens do processo são: operação mais delicada, altos custos para manter a operação e alto investimento inicial, necessidade de controle adequado do processo por pessoal especializado e maior geração de lodo, além disso, o sistema faz com que seja necessário um completo controle em laboratórios (FOELKEL, 2014).

A lagoa aerada atua de forma semelhante ao processo de lodos ativados. A principal diferença com esse sistema é justamente o sistema de recirculação de lodo (sólidos), uma vez que estes não estão presentes em lagoas aeróbias. Por esse motivo, a concentração de sólidos da lagoa é menor do que aquela no sistema de lodo ativado, em torno de 20 a 30 vezes.

Os sistemas de lodos ativados são classificados de acordo com a idade do lodo, isso se aplica tanto para sistemas de fluxo contínuo quanto para sistemas de fluxo intermitente. Porém, a aeração prolongada é mais comum em sistemas de fluxo intermitente.

O sistema de lodo ativado também pode ser utilizado como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Nesses casos, a opção mais conveniente é a da idade do lodo convencional (VON SPERLING, 2002).

#### 4.1.1.3. Tratamento por filtro biológico

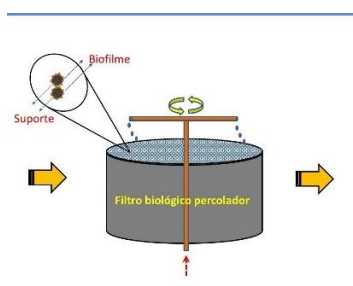
Os filtros biológicos funcionam a partir do desenvolvimento de microrganismos especializados em retirar da água substâncias sólidas, dissolvidas, gases e em degradar compostos químicos e orgânicos.

Os filtros biológicos possuem um uso restrito nas indústrias de papel e celulose, por problemas com o entupimento do meio filtrante, pelo alto custo e pela baixa eficiência para a redução de DBO, pois reduzem em apenas 40 ou 50% da DBO quando trabalham em altas taxas de vazão e carga de DBO. Os filtros biológicos normalmente têm sua empregabilidade maior quando os efluentes são tratados por lodos ativados (GRIECO, 1995).

Sobre o funcionamento do filtro biológico, diferentes microrganismos desempenham diferentes tarefas e permitem, além da redução de DBO, remover amônia, remover nitritos, remover sólidos orgânicos dissolvidos, adicionar oxigênio, remover dióxido de carbono, remover excesso de nitrogênio e outros gases dissolvidos e remover sólidos em suspensão.

Um dos tipos mais utilizados para este pós-tratamento é o filtro aeróbio de leito fixo. Este é um sistema simples e de baixo custo onde o efluente é distribuído por um “chuveiro” figurante os poros em cuja superfície se desenvolveu um limo ou biota complexa, também chamada de biofilme. Um esquema do filtro biológico pode ser conferido na Figura 13.

**Figura 13: Esquema de filtro biológico com leito fixo.**



**Fonte:** Belli (2020).

Este biofilme contém bactérias, fungos, protozoários entre outros e, enquanto o efluente percorre pela superfície porosa, esta comunidade absorve os nutrientes orgânicos dissolvidos, extraindo o alimento para seu desenvolvimento e purificando a água em consequência.

Quando o efluente atinge o fundo do “leito” já se pode considerar tratado sendo então coletado na base do tanque. A aeração ocorre através do movimento de ar por entre a mídia, podendo o efluente tratado precisar de recirculação até atingir o tratamento necessário.

Existem filtros de baixa, média e alta taxa variando de 1,1 a 40 m<sup>3</sup> de água por m<sup>2</sup> de filtro onde se pode variar o tipo de mídia, a altura da coluna e a quantidade de ar, a DBO e o nitrogênio (N-NH<sub>4</sub>) envolvido. Um dos grandes problemas destes sistemas é a possível oclusão ou entupimento da porosidade pelo desenvolvimento descontrolado do biofilme (SANTOS, 2005).

#### **4.1.1.4. Diferentes sistemas de ETEs nas indústrias atuais**

##### **a. RIPASA S. A. CELULOSE E PAPEL - Unidade Americana/ Limeira – SP**

Empresa voltada à produção de celulose, papéis de imprimir, escrever, especiais, papel cartão e cartolinas. O sistema de tratamento da Ripasa S/A consiste em:

- Tratamento primário: decantador primário;
- Tratamento secundário: lagoa aerada 1 (lagoa de estabilização), tecnologia Kaldness (nova tecnologia que substitui lagoas aeradas, os kaldness são estruturas que auxiliam a formação do biofilme), decantadores secundários;
- Tratamento terciário: lagoa aerada 2 (lagoa de estabilização).

##### **b. SANTHER FAB DE PAPEL STA THEREZINHA S.A. - Unidade Santa Terezinha – MG**

Empresa é uma das maiores produtoras nacionais na linha de papéis de baixa gramatura para higiene pessoal, com sistemas inovadores de utilização de aparas nas receitas dos papéis.

O sistema de tratamento da Santher S/A consiste em:

- Pré-tratamento: elevatória de efluente bruto;
- Tratamento primário: decantador primário;
- Tratamento secundário: lagoa aerada N1, lagoa aerada N2, lagoa de decantação;
- Tratamento terciário: sistema de desidratação de lodo.

### **c. ADAMI S/A MADEIRAS - Unidade Caçador – SC**

Os principais produtos desenvolvidos pela atividade industrial da Adami S/A são: madeira serrada e beneficiada, paletes, painéis, molduras, portas, kits de portas, modulados, papel para embalagens, chapas e caixas de papelão ondulado, energia elétrica e o plantio de florestas produtivas, desde a produção de mudas até a colheita. O sistema de tratamento da Adami S/A consiste em:

- Pré-tratamento: filtro por gradeamento, caixa de areia (sedimentação de grãos), peneiramento;
- Tratamento primário: flotação, tanque de homogeneização do líquido clarificado, tanque de aeração;
- Tratamento secundário: decantador secundário, lodo ativado.

### **d. RIGESA, CELULOSE, PAPEL E EMBALAGENS S. A. – Unidade Valinhos**

A Rigesa, Celulose, Papel e Embalagens Ltda., não atua mais na cidade de Valinhos, entretanto, sua presença existiu por mais de 60 anos no mercado brasileiro de papel e embalagens de papelão ondulado e de papel cartão. A empresa desenvolvia atividades de reflorestamento, plantio, colheita, tratamento de efluentes e coleta seletiva de resíduos sólidos de suas fábricas, em especial na fábrica de Valinhos. O sistema de tratamento da Rigesa de Valinhos consistia nas seguintes etapas:

- Tratamento Primário: flotação;
- Tratamento Secundário: lagoa aerada, lodo ativado, decantador secundário
- Tratamento Terciário: lagoa de polimento.

No Quadro 7 pode-se conferir um resumo do tratamento aplicado em cada uma das indústrias mencionadas anteriormente.

**Quadro 7: Resumo do tratamento utilizado em algumas indústrias do ramo de papel e celulose.**

	<b>Ripasa</b>	<b>Santher</b>	<b>Adami</b>	<b>Rigesa</b>
<b>Pré-tratamento</b>		elevatória de efluente bruto	filtro por gradeamento, caixa de areia (sedimentação de grãos), peneiramento	flotação
<b>Tratamento primário</b>	decantador primário;	decantador primário	flotação, tanque de homogeneização do líquido clarificado, tanque de aeração	
<b>Tratamento secundário</b>	lagoa aerada 1 (lagoa de estabilização), tecnologia Kaldness (nova tecnologia que substitui lagoas aeradas), decantadores secundários;	lagoa aerada N1, lagoa aerada N2, lagoa de decantação	decantador secundário, lodo ativado	lagoa aerada, lodo ativado, decantador secundário
<b>Tratamento terciário</b>	lagoa aerada 2 (lagoa de estabilização).	sistema de desidratação de lodo.		lagoa de polimento

**Fonte:** Autoria própria (2022).

#### **4.1.2. Tratamento biológico anaeróbio**

A digestão anaeróbia é considerada uma fonte limpa de tratamento de efluentes, e de qualquer matéria orgânica, já que pretende converter essa matéria orgânica em um produto com maior valor agregado. Nesse caso, a situação seria utilizar o gás metano produzido pela digestão anaeróbia como fonte de energia renovável.

O tratamento biológico anaeróbio foi dado como um tratamento adequado e de baixo custo para a transformação biológica de conteúdo orgânico de despejo industrial em biogás. Enzimas e microrganismos são responsáveis pela degradação da matéria orgânica em um ambiente com privação de oxigênio. São seguidos os processos de hidrólise, acidogênese e metanogênese dentro de um reator (CABRERA, 2017).

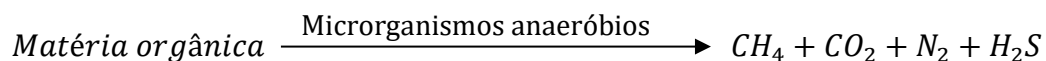


O uso desse tipo de tratamento para o manejo de efluente industrial tem bom custo benefício, tanto por conta da geração de biogás, que pode ser utilizado para produzir energia ou calor que pode ser utilizado em outras etapas do processo de fabricação, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa (ASHRAI et al., 2013), ou ainda, o impacto na redução da poluição que é causado.

A digestão anaeróbia do efluente da indústria de papel e papelão é um tratamento efetivo pois tem alta eficiência dada a alta produção de metano (55-70% dos produtos da reação) e baixa produção do lodo, que acumula a matéria orgânica.

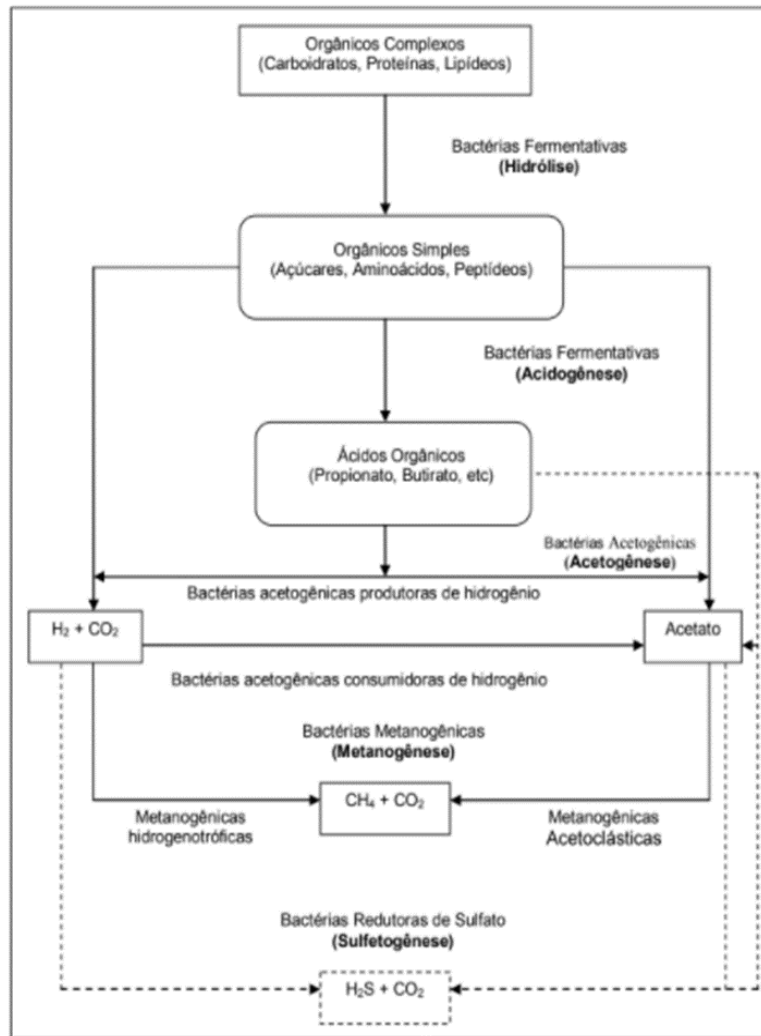
Além disso, esse processo tem baixo custo, já que há baixa reposição dos microrganismos utilizados, uma vez que estes demoram para se replicar, ao passo que não há muita formação de lodo, onde os microrganismos acabam se concentrando. Ademais, existem várias espécies de microrganismos que podem fazer este trabalho.

A degradação microbiológica de matéria orgânica em um ambiente anaeróbio só pode ser obtida por microrganismos capazes de utilizar moléculas, ao invés de oxigênio, como receptores de hidrogênio. A reação completa pode ser simplificada como mostrado abaixo:



A digestão anaeróbia ocorre por meio de várias etapas, nas quais são necessários diferentes tipos de microrganismos em cada uma delas, como se segue na Figura 14.

**Figura 14: Esquema da digestão anaeróbia da matéria orgânica.**



**Fonte:** Adaptado de Chernicharo (2007).

A primeira etapa da digestão é a hidrólise. A hidrólise consiste em uma etapa lenta, que pode ser acelerada pelo aumento da temperatura, e ocorre com o pH levemente ácido. Nela ocorre a transformação de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores). Esse processo ocorre através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas.

Depois, tem-se a decomposição anaeróbia, geralmente dividida em duas fases: a fase acidogênica e a fase metanogênica, podendo ainda ter uma fase intermediária, a acetogênica.

A fase acidogênica faz com que os compostos gerados na etapa anterior, sejam convertidos pelas bactérias formadoras de ácidos, sendo que essa fase tem cinética rápida, fazendo com que uma grande parte da matéria seja convertida pela ação da biomassa microbiana. Os compostos produzidos nesta etapa incluem ácidos graxos voláteis, em grande

quantidade, além de álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, e novas células bacterianas. As bactérias que realizam esta fase podem ser anaeróbias ou facultativas.

A fase acetogênese, que pode ser definida como uma fase mediana, consiste na ação das bactérias acetogênicas, que são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase anterior em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas. Os produtos gerados, e que são apropriados para a próxima fase são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato.

Já a fase de metanogênese consiste em metabolizar os compostos simples como o dióxido de carbono, hidrogênio molecular, ácido acético e metanol, gerados na etapa anterior, através das bactérias metanogênicas, havendo desassimilação de metano e dióxido de carbono. Além disso, as bactérias metanogênicas são divididas em dois grupos principais:

- Metanogênicas acetoclásticas, que formam metano a partir do ácido acético ou metanol. Responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano.
- Metanogênicas hidrogenotróficas, sendo praticamente todas as espécies conhecidas de bactérias metanogênicas, que são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.

Há ainda uma fase extra que pode acontecer chamada de sulfetogênese, na qual a produção de sulfetos é feita por um processo no qual o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de microrganismos anaeróbios estritos, as denominadas bactérias redutoras de sulfato, ou bactérias sulforedutoras. Entretanto, essa etapa acontece somente no caso de ter muita presença de enxofre no meio.

Existem também alguns fatores que podem afetar a digestão anaeróbia, fazendo-a ser mais ou menos produtiva em relação a ação dos microrganismos.

Um primeiro ponto que influencia diretamente a digestão é a temperatura. As bactérias que operam numa faixa inferior a 20°C são chamadas psicrófilas; outras operando entre 20 a 45°C são chamadas mesófilas e acima de 45°C operam as bactérias termófilas. Em geral, a produção de gás aumenta com o aumento da temperatura (até 70 graus em média), entretanto, a maioria das indústrias, que trabalham com a digestão anaeróbia, usam temperaturas medianas para não ter que se preocupar com o controle muito rígido da temperatura.

Outro ponto que influencia bastante esse método de tratamento é o pH e a acidez do meio. O pH deve ser mantido entre 6 e 8, sendo que o ponto ótimo para o funcionamento das bactérias é entre 7 e 7,2. Por características e etapas do processo, às vezes esse pH pode variar,

neste caso, deve-se esperar um tempo para continuar o processo, ou tratar com hidróxido de cálcio.

Inicialmente, as bactérias formadoras de ácidos fracionam a matéria orgânica e produzem ácidos voláteis, resultando no aumento da acidez do meio e uma redução do pH. Quando as bactérias metanogênicas começam a agir, transformam os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH.

Outro fator que tende a elevar o pH é o teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a ser digeridas. Um terceiro fator atuante sobre o pH do meio, agindo de modo a estabilizá-lo, é o bicarbonato, a concentração deste íon é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio.

Assim, se as bactérias do primeiro grupo são muito rápidas e produzem mais alimentos do que as metanogênicas conseguem digerir, o dióxido de carbono liberado tornará maior a concentração de bicarbonato, o que impede a queda acentuada no pH.

Com o correr da degradação do material orgânico em um sistema fechado, o pH tende a se elevar e a produção de metano tem o seu pico. Já se o conteúdo de um digestor em operação torna-se muito ácido, o método mais comum para se restaurar o pH ideal é interromper sua alimentação por alguns dias, dando um tempo para as bactérias metanogênicas reduzirem a concentração dos ácidos voláteis.

Em digestores de grande porte, nos quais a interrupção da alimentação é complicada devido a problemas de estocagem do resíduo, o pH é usualmente elevado pela adição de hidróxido de cálcio, altamente alcalino.

A concentração e composição do resíduo também são fatores influentes na digestão, já que existe a proporção direta entre quantidade de sólidos voláteis, disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, e a produção de metano, sendo também diretamente proporcional a DQO. Apesar disso, cada tipo de componente que pode estar presente deve ser monitorado para maximizar a produção de gás metano, uma vez que alguns compostos podem desviar essa produção (como concentrações altas de S), alguns podem estimular (como Fe e Ni), e alguns podem ainda ser inibidores (como detergentes biodegradáveis).

Por fim, a agitação faz com que o substrato tenha maior contato com as bactérias, distribui melhor o calor na biomassa e gera uniformemente cada produto intermediário, além de fazer com que não tenha entupimentos ou incrustações no reator. Para a agitação pode-se utilizar mecanismos de acionamento direto com um eixo e hélice em contato com a biomassa ou pode-se ter o borbulhamento do biogás. Por outro lado, a formação de crosta é, dentro de

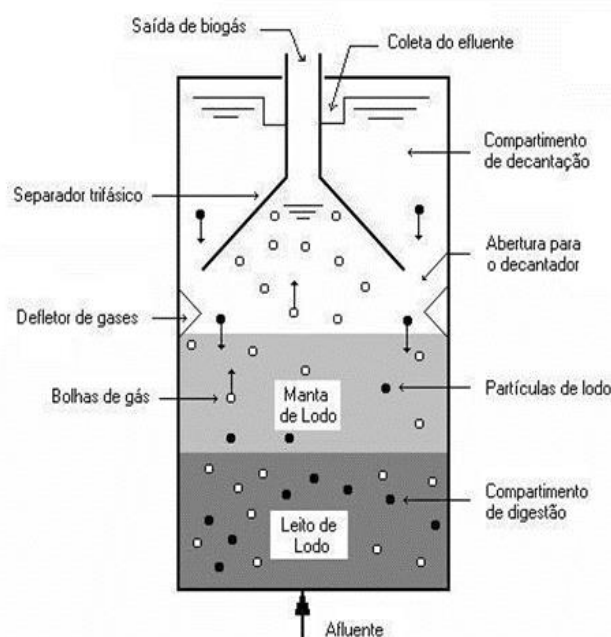
certos limites, extremamente positiva e se dá devido ao fato de as bactérias anaeróbias possuírem propriedade aderente, portanto, a agitação deve ser balanceada.

Os equipamentos utilizados nesse processo são chamados de digestores. Estes consistem basicamente numa câmara de fermentação, onde é processada a biodigestão da matéria orgânica, numa campânula que armazena o gás produzido ou, simplesmente, numa saída para este gás, em uma entrada do substrato a ser fermentado e numa saída para o efluente produzido pelo processo.

O biorreator mais utilizado para a produção de biogás dentro da indústria é o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). As principais características desse tipo de biorreator são a distribuição do afluente e o separador de três fases.

No reator UASB, o substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbio. O resíduo, que é formado por partículas reduzidas do material orgânico, flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo e depois pela manta de lodo, na qual sua DBO é parcialmente convertida em biogás. No topo do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granuloso que foi arrastado e o biogás, como mostrado na Figura 15. Enquanto o biogás é retirado do sistema, o lodo granuloso, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente líquido sai pela parte mais alta do reator, podendo ser destinado a outros tratamentos para posterior reuso.

**Figura 15: Biorreator do modelo UASB.**



**Fonte:** Chernicharo (2007).

A biodigestão anaeróbia é um tratamento já utilizado, e conhecido em muitos lugares, inclusive para outros fins. O biogás que é gerado pode ser utilizado como gerador de eletricidade, sendo essa uma utilização bastante comum. Além disso, pode-se ter o uso do biogás (metano) como substituto nas etapas de prensagem e secagem do jumbo de papel e do papelão, como fonte de energia para os equipamentos.

Tipicamente, para o efluente da indústria de papel e papelão, os maiores inibidores da digestão anaeróbica incluem: sulfito, taninos, resina ácida, ácidos graxos com grandes cadeias, e compostos halogenados (ALI e SREEKRISHNAN, 2001; CHEN et al., 2008). Esses inibidores, assim como as características nas quais os efluentes deixam a indústria de papel, podem ser conferidos no Quadro 8. O quadro apresenta as características de acordo com o estágio em que a água residuária deixa a produção.

**Quadro 8: Características do efluente gerado pela indústria de papel.**

<b>Água residuária</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>Degradação (%)</b>	<b>Inibidores da digestão anaeróbia</b>
<b>Descascamento a úmido</b>	1300-1400	44-78	Taninos, resina ácida
<b>Polpa</b>	1000-560	60-87	Resina ácida
<b>Polpa termomecânica</b>	2500-13000	40-60	Resina ácida, ácidos graxos e sulfitos
<b>Polpa química</b>	7000	-	Sulfitos e amônia
<b>Branqueamento por cloro</b>	900-2000	30-50	Fenois clorinados, resina ácida
<b>Liquor de sulfito</b>	120000-220000	-	Sulfitos, resina ácida, ácidos graxos
<b>Condensado Kraft</b>	1000-33600	83-92	Sulfitos, resina ácida, ácidos graxos
<b>Condensado de sulfito</b>	7500-50000	50-90	Sulfitos e sulfitos orgânicos

**Fonte:** Saleh e Mahmood (2004).

O entendimento dos inibidores dos mecanismos da digestão anaeróbia é essencial para uma boa produção de biogás ser mais eficiente. O aumento da eficiência dos reatores anaeróbios por meio de inovações científicas e tecnológicas também serviria como a chave para o uso comercial mais amplo da digestão anaeróbica.

No Quadro 9 são apresentados alguns exemplos do uso de tecnologias que melhoraram a eficiência do tratamento em questão.

**Quadro 9: Exemplos típicos do uso de tecnologias no tratamento anaeróbio para produção de biogás na indústria de papel e celulose.**

<b>Indústria</b>	<b>Tipo de produção e características</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Detalhes do reator</b>	<b>Ano de início de funcionamento</b>	<b>Performance da planta</b>
MacMilan Bloedel LTD. Canada	Papelão corrugado/NSSC Fluxo: 6.300m <sup>3</sup> /d DQO carregada: 107t/d	Biothane Systems International	UASB V=7.000m <sup>3</sup> (2x2.500m <sup>3</sup> Raio) VLR = 15,4kg	1989	Produção de gás: 1140m <sup>3</sup> /h Redução de DQO: 55% Redução DBO: 85%
Stone Container Canada	CTMP/NSSC reciclado Fluxo: 656m <sup>3</sup> /d DQO carregada: 7,7t/d	Biothane Systems International	UASB V=15.600m <sup>3</sup> (2x7.800m <sup>3</sup> Raio) VLR = 15,4kg	1988	Redução DBO: 85%
Satia Paper Mills LTD. India	Polpa química utilizando resíduos da agricultura Fluxo: 4.500m <sup>3</sup> /d DQO carregada: 53t/d	Paques BV	UASB V=5.200m <sup>3</sup> (2x2.600m <sup>3</sup> Raio) VLR = 10kg	1997	Produção de gás: 10.000-12.000m <sup>3</sup> /h Redução de DQO: 50-60% Redução DBO: 60-70%

**Fonte:** Wang et al. (2004).

Poucas indústrias na atualidade utilizam este método pelo maior investimento em estudos necessários para uma boa efetividade deste tratamento. O estudo utilizado como base neste caso não identificou a indústria em questão por motivos de confidencialidade, apenas se sabe a localização da mesma, *New Borg El-Arab City*, Egito. O estudo é justamente a análise de viabilidade da instalação e dos parâmetros necessários para o tratamento do efluente de despejo no meio ambiente.

No estudo base, foi utilizada a aplicação sustentável de um reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) para tratar efluentes de uma indústria real de papel e papelão. O efluente em questão continha bronopol (2-bromo-2-nitropropan-1, 3-diol).

## 4.2. Pós-tratamento de efluentes na indústria de papel

Além do papel fundamental do tratamento à nível aceitável pelas legislações ambientais locais, é importante que a indústria se preocupe com a utilização desses efluentes depois do tratamento exigido. Um passo comum antes do despejo final dos efluentes da indústria é o tratamento por coagulação, flotação e sedimentação para clarificação do efluente.

A técnica físico química é uma das mais utilizadas no tratamento de águas residuárias industriais e tem sido aplicada, geralmente, precedendo algum outro tratamento biológico ou como tratamento final em ETEs sem tratamentos químicos ou biológicos durante o processo. O tratamento tem como objetivo uma inicial redução na carga orgânica do efluente. Ela consiste basicamente na junção de dois processos muito convencionais na indústria, a coagulação e a floculação.

Os processos mencionados visam aglutinar as partículas suspensas presentes nos efluentes das indústrias mediante a adição de coagulantes. O intuito é reduzir os sólidos em suspensão, a matéria orgânica e também, alguns poluentes que estiverem presentes na fase líquida, de forma a transferi-los para a fase sólida formada (lodo). O tratamento também atua na redução de DBO e DQO, além da clarificação da fase líquida.

A coagulação é a primeira etapa do tratamento e consiste na introdução de um produto coagulante, capaz de anular as cargas das partículas do efluente. A coagulação é responsável pela aproximação das partículas presentes no meio líquido assim como pela formação de aglomerados de maiores tamanhos que possuem maior tendência a sedimentar. Esse processo acontece em recipientes com mistura em alta velocidade, para uma melhor distribuição do coagulante inserido.

O próximo passo é a floculação. Nesta etapa, o processo muda a velocidade de agitação do líquido e do tempo de espera no recipiente, de forma que sejam formados aglomerados ainda maiores de partículas que vão futuramente sedimentar.

Essa etapa acontece depois da coagulação e consiste em um processo mecânico o qual produz agitação no meio e provoca choques e colisões entre as partículas. A agitação, nesse caso, precisa ser lenta para que as colisões entre as partículas não sejam capazes de romper outras ligações que formam flocos.

Por fim, ocorre a etapa de sedimentação, em que a solução é deixada em repouso para que os flocos formados nos processos descritos anteriormente possam sedimentar, formando assim o lodo.



A escolha do tipo de coagulante usado assim como as agitações ideais em cada etapa desse processo são parâmetros que devem ser estudados para cada efluente, dado a sua caracterização inicial, e as condições que se deseja despejar o efluente no ambiente ou para retornar ao uso no processo industrial.

### **4.3. Investimentos necessários em cada tipo de tratamento**

Para um estudo mais justo sobre os investimentos envolvidos em cada opção, será utilizada uma combinação única de tratamentos possíveis em uma ETE, seguindo uma ordem lógica e teórica, dadas as funções de cada etapa do tratamento.

É importante ressaltar que os investimentos necessários podem variar de acordo com o tamanho da indústria e da vazão de efluentes que cada indústria possui, o estudo apresentado aqui considera uma indústria com capacidade de produção de até 70 mil toneladas de jumbo de papel, com vazão de efluentes em torno de 800 m<sup>3</sup> por hora.

Vale comentar que os valores estimados foram feitos a partir de dados do setor e estimativas retiradas internamente da indústria Carta Fabril - RJ, produção base 2021.

#### **a. ETE: pré-tratamento**

##### **Sistema de peneiramento**

O sistema de peneiramento possui diversos tipos de uso e de finalidades. O uso deste sistema depende da qualidade do efluente que será passado por essa etapa, e ainda, pode ser diferente para o efluente de cada parte do processo.

Por isso, a determinação de um sistema de peneiramento é ligeiramente complexa sem ter análises completas, e por isso não foram encontrados estudos que pudessem ser conclusivos sobre essa etapa do tratamento de efluentes.

Entretanto, existem muitas opções para aquisição desta etapa do tratamento em empresas fornecedoras de materiais e equipamentos para indústrias.

Apenas a título de comparação, é possível delimitar o preço de um sistema de peneiramento necessário para a vazão em questão de em torno de R\$100 mil, com base em pesquisas em sites de fornecedoras deste equipamento.

## **b. ETE: tratamento primário**

### **Tanque decantador primário**

O tanque de decantação primária é mais utilizado entre as indústrias para essa etapa do processo, vide as indústrias apresentadas no capítulo anterior. No caso hipotético que está sendo seguido para questões deste estudo, o tanque decantador primário já está sendo considerado dentro das opções de tratamento secundário e terciário de acordo com o dimensionamento exigido por cada um.

## **c. ETE: tratamento secundário**

### **Lagoa de estabilização**

A lagoa aerada, assim como o tanque de decantação primário é uma das etapas mais utilizadas em indústrias do ramo. Um dos motivos é o grande espaço normalmente disponível em indústrias de papel e papelão que sejam integradas com a indústria de celulose.

Para uma lagoa de estabilização, existem alguns estudos que especificam o dimensionamento necessário para uma vazão de 800 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma indústria de médio porte. Um dimensionamento para o caso pode ser conferido no Quadro 10.

**Quadro 10: Etapas constituintes do tratamento por lagoa de estabilização.**

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Lagoa anaeróbia</b>	Escavada no solo. Volume = 45.000m <sup>3</sup>
<b>Lagoa facultativa 1</b>	Escavada no solo. Volume = 148.200m <sup>3</sup>
<b>Lagoa facultativa 2</b>	Escavada no solo. Volume = 148.200m <sup>3</sup>
<b>Lagoa facultativa 3 (polimento)</b>	Escavada no solo. Volume = 148.200m <sup>3</sup>

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

Seguindo essas especificações, os investimentos médios estimados para a implantação das lagoas de estabilização estão descritos no Quadro 11.

**Quadro 11: Custos estimados para implantação de lagoas de estabilização.**

<b>Especificação</b>	<b>Total</b>
<b>Lagoa anaeróbia</b>	R\$3.600.000,00
<b>Lagoa facultativa 1</b>	R\$20.400.000,00
<b>Lagoa facultativa 2</b>	R\$20.400.000,00
<b>Lagoa polimento</b>	R\$20.400.000,00
<b>Total geral</b>	<b>R\$64.800.000,00</b>

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

#### **d. ETE: tratamento terciário**

##### **Lodo ativado**

O lodo ativado, como visto, é um dos artifícios mais utilizados como tratamento nas ETEs. Conforme será visto, o modelo de tratamento apresenta um valor reduzido de investimento perante outros tipos de tratamento e outras etapas, além de baixo custo para manter a operação rodando.

Para o lodo ativado, existem alguns estudos que especificam o dimensionamento necessário para uma vazão de 800 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma indústria de médio porte. Um dimensionamento relacionado com o sistema de lodo ativado pode ser conferido através do Quadro 12.

**Quadro 12: Etapas constituintes do tratamento por sistema de lodo ativado.**

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Primeiro decantador (pré-lodo)</b>	Circular com ponte raspadora de lodo. Volume = 812m <sup>3</sup>
<b>Tanque de aeração (reator biológico)</b>	2 tanques de alvenaria (em paralelo). Volume = 2.400m <sup>3</sup> cada
<b>Segundo decantador (pós-lodo)</b>	2 tanques circulares com pontes raspadoras de lodo (em série). Volume = 3.500m <sup>3</sup> cada

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

Seguindo essas especificações, os investimentos médios estimados para a implantação do sistema de lodo ativado estão descritos no Quadro 13.

**Quadro 13: Custos estimados para implantação de sistema de lodo ativado.**

<b>Especificação</b>	<b>Total</b>
<b>Decantador primário</b>	R\$85.000,00
<b>Reator biológico</b>	R\$491.000,00
<b>Decantador secundário</b>	R\$654.000,00
<b>Leitos de secagem de lodo</b>	R\$4.900.000,00
<b>Total geral</b>	<b>R\$6.200.000,00</b>

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

**e. ETE: pós-tratamento**

**Sistema de coagulação, floculação e sedimentação**

Conforme comentado anteriormente, o sistema de coagulação, floculação e sedimentação não é tão comumente utilizado, porém, o mesmo melhora as condições finais do efluente no caso deste ser despejado no meio ambiente, por isso, neste estudo serão considerados os investimentos necessários para sua implementação.

Para o sistema de coagulação, floculação e sedimentação, existem alguns estudos que especificam o dimensionamento necessário para uma vazão de 800 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma indústria de médio porte. Para este sistema, pode-se observar o Quadro 14, que traz um dimensionamento preliminar.

**Quadro 14: Etapas constituintes do tratamento por coagulação, floculação e sedimentação.**

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Primeiro tanque (mistura rápida - coagulação)</b>	4 tanques em alvenaria (em paralelo), com agitador mecânico, 25HP. Volume = 20m <sup>3</sup> cada
<b>Segundo tanque (mistura lenta - floculação)</b>	Tanque em alvenaria, com agitador mecânico, 1,5HP. Volume = 1.200m <sup>3</sup> cada
<b>Decantador (sedimentação)</b>	Tanques circular com ponte raspadora de lodo. Volume = 812m <sup>3</sup> cada

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

Nota-se, neste caso, que as especificações de volume são relativamente menores, dado que o tempo de residência do líquido deve ser baixo em cada etapa, em torno de poucos minutos.

Seguindo essas especificações, os investimentos médios estimados para a implantação do sistema de coagulação, floculação e sedimentação estão descritos no Quadro 15.

**Quadro 15: Custos estimados para implantação de sistema de coagulação, floculação e sedimentação.**

<b>Especificação</b>	<b>Total</b>
<b>Tanque de mistura rápida</b>	R\$29.000,00
<b>Tanque de mistura lenta</b>	R\$180.000,00
<b>Decantador</b>	R\$84.000,00
<b>Total geral</b>	<b>R\$293.000,00</b>

**Fonte:** Adaptado de Krause et al. (2010).

Apesar dos baixos custos de implementação deste tipo de tratamento, os custos operacionais dessa solução são mais elevados do que das outras soluções em torno de 10 vezes.

#### **f. Tratamento por biodigestão anaeróbia**

##### **Tratamento por reator UASB**

O sistema de tratamento por digestão anaeróbia é bastante utilizado em indústrias mais estruturadas e com mais condições de realizar estudos mais completos em relação aos tratamentos de efluentes da mesma.

Para o sistema de digestão anaeróbia por reator do tipo UASB, existem alguns estudos que especificam o dimensionamento necessário para uma vazão de 800 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma indústria de médio porte. Um dimensionamento preliminar para o reator pode ser conferido no Quadro 16.

**Quadro 16: Etapas constituintes do tratamento por biodigestão anaeróbia com recuperação de biogás.**

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Tanque do reator UASB</b>	2 tanques de reator UASB (em paralelo). Volume = 195m <sup>3</sup> cada

**Fonte:** Adaptado de Tawfik et al. (2021).

Seguindo essas especificações, os investimentos médios estimados para a implantação do sistema de digestão anaeróbia estão descritos no Quadro 17.

**Quadro 17: Custos estimados para implantação de sistema de digestão anaeróbia.**

<b>Especificação</b>	<b>Total</b>
<b>Tanque do reator UASB</b>	R\$25.500.000,00
<b>Conexão elétrica e preparação de terreno</b>	R\$5.500.000,00
<b>Total geral</b>	<b>R\$31.000.000,00</b>

**Fonte:** Adaptado de Tawfik et al. (2021).

O uso deste tratamento pode ser implementado sozinho na indústria, e por isso pode dar a impressão de menor investimento necessário para isso, entretanto, é importante salientar que o custo de operação anual desta solução é mais elevado, e é em torno de quatro a cinco vezes maior do que os custos envolvidos na coagulação, floculação e sedimentação, sendo em torno de três vezes maior anualmente do que os custos totais de uma ETE comum, com pré-tratamento, tratamento primário, secundário e terciário.

Para se ter uma noção da ordem de grandeza, os custos operacionais incluídos na manutenção e operação de um reator UASB como equipamento para o tratamento de efluente da indústria de papel e papelão, é em torno de um quarto do valor total de investimento inicial anualmente.

#### **4.4. RESULTADOS**

Para os sistemas de tratamento com ETEs comuns, que seguem a ordem de: pré-tratamento, tratamento primário, secundário e terciário, é necessária uma análise profunda sobre as características exigidas pelas leis locais, dado que algumas ETEs não contam com tratamentos químicos ou biológicos, que melhorariam o resultado final com um pós-tratamento.

Estudos com as principais indústrias do ramo mostram certa eficiência nos tratamentos. Entretanto, esse tratamento se mostra não ser 100% eficiente uma vez que os efluentes são despejados no meio ambiente, causando ainda problemas ambientais no entorno.

Como exemplo, tem-se os resultados obtidos para a fábrica da SANTHER S/A, que teve procedimento da ETE demonstrada anteriormente, para a qual estudo indicam (BRANDÃO, 2014):

- Os valores de DBO, DQO e SST, óleos e graxas, temperatura e pH do efluente na saída da ETE apresentaram-se dentro dos limites da legislação para lançamento de efluentes e o efluente não apresentou toxicidade aguda ou crônica.
- O sistema de tratamento apresentou eficiências de remoção de cerca de 82% para a remoção de DQO, 83% da DBO, 95% de SST e 84% de remoção de óleos e graxas. Apesar da legislação não apresentar limite das concentrações de N e P para lançamento, tanto nitrogênio quanto o fósforo foram encontrados em excesso, possivelmente associados à adição de micronutrientes no sistema, devendo ser reavaliada a dosagem colocada no sistema.
- Os resultados obtidos na avaliação das características físico-químicas do córrego próximo a Santher, foram realizados tanto a montante da fábrica quanto a jusante, sendo que a DBO a jusante da fábrica excedeu o limite preconizado na legislação. Há indícios de aumento de matéria orgânica, sólidos suspensos, fósforo e pH do córrego após o lançamento do efluente da fábrica.
- O estudo também avaliou um acompanhamento abaixo do ideal para a ETE e para os parâmetros de projeto estabelecidos na mesma. Indicando uma dificuldade de acompanhamento de parâmetros ao longo da ETE.

Isso acontece principalmente por conta da falta de tratamento em características como cor e cheiro do efluente, que muitas vezes não são endereçados, e nesses casos, o emprego do pós-tratamento com: coagulação, floculação e sedimentação, conforme apresentados são úteis. Outros fatores como acompanhamento mais rígido dos parâmetros são extremamente importantes para o melhor funcionamento da ETE.

Estudos desse tipo de tratamento como pós-tratamento indicaram (KURITZA, 2012):

- Alguns ensaios preliminares de coagulação/floculação/sedimentação mostraram que o coagulante utilizado individualmente não apresenta bons resultados de remoção dos contaminantes, sendo necessária a adição de um polímero como auxiliar de floculação.

- Ao longo dos ensaios preliminares é possível a conclusão de que as velocidades de sedimentação possuem menos influência na eficiência do tratamento do que as dosagens de coagulante e polímero.
- A unidade piloto de microfiltração tangencial melhorou a qualidade final do efluente da indústria de papel e celulose empregada. Houve remoção de 90% de turbidez, 80% de cor aparente, 75% de cor verdadeira, 65% de DQO, 60% de lignina e 40% de sólidos totais. Dessa forma, o uso desse tratamento é bastante eficiente como pós-tratamento e cumpre com os objetivos iniciais.

Para os tratamentos de efluentes que contam com a biodigestão anaeróbia, é possível notar um ótimo retorno principalmente em relação à remoção de DBO e DQO. Além disso, a formação de biogás também é avaliada como um parâmetro importante nesses estudos.

O estudo utilizado como base na indústria de papel e papelão no Egito indicou (TAWFIK et al., 2022):

- Em um tempo de retenção do reator UASB, de 11,7 h e uma concentração de bronopol de 7,0 mg/L, a eficiência de remoção de DBO total foi de  $55,3 \pm 5,2\%$ , de DBO solúvel foi de  $26,8 \pm 2,3\%$ , remoção de sólidos em suspensão foi de  $89,4 \pm 2,6\%$  e de carboidratos e proteínas foi de  $72,1 \pm 1,8\%$ , e  $22,4 \pm 1,8\%$ , respectivamente.
- A conversão de compostos orgânicos complexos (por exemplo, carboidratos) em biometano ( $\text{CH}_4$ ), foi auxiliada através de atividades enzimáticas como de  $\alpha$ -amilase,  $\alpha$ -xilanase e carboximetilcelulase.
- As atividades enzimáticas e metanogênicas foram capazes de converter o substrato complexo e metabólitos solúveis em bio- $\text{CH}_4$ , equivalente a  $191 \pm 11$  mL por grama de DQO removido.
- Padrões estabelecidos pela ONU de emissão de gases são atendidos pela geração de biogás e economia de outras vias de uso de energia.

As indústrias apresentadas nos estudos avaliados pelo presente trabalho já possuem implantação antiga e, portanto, é provável que inclusive todo o investimento já tenha depreciado ao longo do tempo até o presente momento. Entretanto, como um resultado esperado é que ao longo do tempo, todas essas ETEs acopladas às indústrias de origem, possuem bons custos versus o que poderia ser gasto no caso de uma terceirização deste tratamento, colocando em evidência a relevância de se fazer a verticalização neste tipo de indústria.

Apesar dos altos custos de implementação, os resultados são bastante condizentes com a realidade. A indústria Softys Brasil, com unidade em Mogi, prevê gastos de até



R\$40.000.00,00 para o planejamento e implantação de uma ETE na unidade de Mogi das Cruzes (São Paulo), que produz cerca de 40 mil toneladas de papel ao ano (dados internos Softys, 2022).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se perceber que os processos de tratamento biológicos são o tipo de tratamento mais usual através das indústrias atuais. O processo de lodo ativado se demonstra como o mais eficiente e que atende aos padrões exigidos pela lei da melhor forma. O tratamento por biodigestão anaeróbia também é uma opção a ser considerada, desde que existam estudos específicos para o efluente da indústria em questão, que devem preceder e dimensionar a implementação do tratamento.

Já que os processos de tratamento biológico não se mostram eficientes na remoção da cor, o processo de tratamento por coagulação, floculação e sedimentação se mostra altamente recomendado.

O menor custo de implementação do tratamento de digestão anaeróbia traz um ótimo benefício para a utilização deste. A remoção de DBO é na verdade inferior a aquela obtida por meio de tratamento por processos de ETE, porém a questão financeira pode ser mais considerada neste caso. Além disso, a remoção de sólidos é satisfatória para o tratamento de digestão anaeróbia.

O resultado ideal seria obtido com uma combinação a ser estudada de todos os tratamentos apresentados, de forma que o tratamento por digestão anaeróbia fosse parte do processo da ETE da indústria em questão.

O próximo passo para determinar o melhor custo/benefício em relação ao tratamento de efluente deste tipo de indústria seria o estudo do sequenciamento mais adequado e com maiores resultados, além do dimensionamento dos equipamentos para constituírem a ETE, incluindo:

- um sistema de peneiramento;
- um sistema de lagoas de estabilização;
- um sistema de lodo ativado;
- um sistema para digestão anaeróbia (com reator UASB) e por fim;
- tratamento por coagulação, floculação e sedimentação.

É importante salientar que isso deve ser feito já com uma indústria em estudo, já que se deve ter as caracterizações específicas para análise de custo/benefício de cada tratamento. Além disso, conforme já mencionado, a verticalização da indústria a partir do tratamento de efluentes dentro da indústria que os gera é benéfico a longo prazo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, G. Y.; ABBASI, B. E. Environmental assessment for paper and cardboard industry in Jordan – a cleaner production concept. *Journal of Cleaner Production* - p. 321-326, 2004

ALI, M.; SREEKRISHNAN, T. R. (2001). “Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: A review,” *Adv. Environ. Res.* 5(2), 175-196. DOI: 10.1016/S1093-0191(00)00055-1

ALMEIDA, C. S.; VIDAL, C. M. S. Avaliação do Desempenho da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma Indústria Papeleira após Alteração em seu Fluxograma de Tratamento. *Revista Eletrônica Lato Sensu – UNICENTRO Ed. 6 Ano: 2008.*

ANAP, Indústria brasileira de papel Tissue e o setor de aparas. Fórum Revista O papel – 79 anos; mercado e gestão. São Paulo, outubro, 2018.

ARAUJO, A. L. P.; COSSICH, E. S.; TAVARES, C. R. G.; Remoção de DQO de efluente de indústria de celulose e papel empregando reagente fenton. *Scientia Plena, Paraná, v. 5, n. 7, 2009.*

ASHRAI, O., YERUSHALMI, L., HAGHIGHAT, F., 2013a. Application of dynamic models to estimate greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry. *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 20 (3), 1858–1869.

ASHRAI, O., YERUSHALMI, L., HAGHIGHAT, F., 2013b. Greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry - modeling and simulation. *Int. J. Greenhouse Control.* 17, 462–472.

ASHRAI, O., YERUSHALMI, L., HAGHIGHAT, F., 2015. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: a review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *J. Environ. Manag.* 158, 146–157.

BELLI, T. J. Tratamento de águas residuárias – Sistemas aeróbios com biofilme. Notas de aula, Universidade do Estado de Santa Catarina. Centro de educação superior do alto vale do Itajaí – CEAVI. 2020.

BONK, F., BASTIDAS-OYANEDEL, J.-R., SCHMIDT, J., 2015. Converting the organic fraction of solid waste from the city of Abu Dhabi to valuable products via dark fermentation - economic and energy assessment. *Waste Manag.* 40, 82–91.

BRANDÃO, M. D. Avaliação operacional da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel. Dissertação de pós-graduação. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Viçosa, MG, 2014.

CABRERA-DIAZ, A., et al., 2017. Anaerobic digestion of sugarcane vinasse through a methanogenic UASB reactor followed by a packed bed reactor. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 183 (4), 1127–1145.

CAMPOS, E. S. Processo de fabricação de papel (uma visão geral). Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2012.

CASTRO, H. F. Papel e celulose, apostila de aula – Processos Químicos Industriais II. Escola de Engenharia de Lorena – EEL, 2009.

CHEN, Y., CHENG, J. J., and CREAMER, K. S. (2008). “Inhibition of anaerobic digestion process: A review,” *Bioresour. Technol.* 99(10), 4044-4064. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.057

CHERNICHARO, C.A.L. - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v.5, 379 p., 2007.

CHINNARAJ, S., VENKOBA RAO, G., 2006. Implementation of an UASB anaerobic digester at bagasse-based pulp and paper industry. *Biomass Bioenergy* 30 (3), 273–277.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem. Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo. Série Relatórios. Apêndice A. 2009.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de mostragem. Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo. Série Relatórios. Apêndice E. 2009.

CONAMA, Resolução. 430/2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, 2011.

DATASCOPE, site de dados. Informações e dados da produção de papel e celulose, 2019.

DEZOTTI, M. Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos. Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ. E-papers. Rio de Janeiro, 2008.

IBA e FAO: EPE (Empresa de Pesquisa Energética); IEA (International Energy Agency); IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). A indústria de papel e celulose no brasil e no mundo: panorama geral, 2022.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Global Forest Resources Assessment, 2015. ISBN 978-92-5-108826-5.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions. New York, Walter de Gruyter, Inc., 1989.

FIGUEIREDO, P. C.; RODRIGUES, A.M. Levantamento das características da Integralização vertical no setor de celulose e papel. Artigo para convibra, 2016.

FGV IBRE. Coordenadora: Viviane Seda Bittencourt. Responsável por análise e divulgação: Anna Carolina Gouveia. Equipe Técnica: Anna Carolina Gouveia, Stefano Pacini. 2022.

FOELKEL, C. Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da Fabricação de Celulose Kraft e Papel de Eucalipto: Processos Aeróbicos por Lodos Ativados para Tratamento de Efluentes. 2014.

FONSECA, J. A. V. M.; BARBOSA, M.; PINTO, N. O.; SALAN, R. S.; SOBRINHO, G. D.; BRITO, N. N.; CONEGLIAN, C. M. R.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Tratamento de Efluentes Líquidos de Indústria de Papel e Celulose. In: III Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, 2003

FRUGONI, Chiara. Invenções da Idade Média. Rio de Janeiro: Zahar, 2007.

GIORDANO, G. Análise e formulação de processos para tratamento dos chorumes gerados em aterros de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro – RJ, 2003. 257p. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) PUC-Rio, 2003.

GRIECO, V. M. Tratamento de Efluentes Líquidos Industriais, São Paulo, 1995.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

KRAUSE, A. L. C.; SANT'ANNA, F. S. P.; Avaliação dos custos para tratamento de efluentes de indústria de papel e celulose considerando os processos de lodos ativados, lagoas de estabilização e físico-químico. Universidade Federal de Santa Catarina, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, março, 2010.

KURITZA, J. C. Aplicação da coagulação, floculação e sedimentação como pós tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2012.

LACORTE, S.; LATORRE, A.; BARCELÓ, D.; RIGOL, A.; MALMQVIST, A.; WELANDER, T. Organic compounds in paper-mill process water and effluents. Trends in Analytical Chemistry, Vol. 22, N°10. 2003.

Lei 6.939, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm)>.

METCALF E EDDY, Inc. Wasterwater engineering. Treatment, disposal, reuse. 4 ed. Boston: McGraw Hill, 2003.

MOTTA, E.; SALGADO, M. L.. O papel: problemas de conservação e restauração. Petrópolis: Museu de Armas Ferreira Cunha, 1971.

PELISSER, C. Obtenção de alita e belita a partir do resíduo de uma indústria de reciclagem de papel. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) – Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2018.

POKHREL, D. and VIRARAGHAVAN, T. (2004) Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater—A Review. *Science of the Total Environment*, 333, 37-58.

RECICLOTECA. Centro de informações sobre reciclagem e meio ambiente. Papel: história, composição, tipos, produção e reciclagem, 2003.

Resolução CONAMA número 357, de 17 de março de 2005. Publicação – Diário Oficial da União – 18/05/2005).

ROBERT, N. T. F. Produção de Embalagem de Papel. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro, 2007.

SALEH, M. M. A., and MAHMOOD, U. F. (2004). “Anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment,” 8th International Water Technology Conference, Alexandria, Egypt.

SANTOS, A. S. P. Avaliação de desempenho de um filtro biológico percolador em diferentes meios suporte plásticos. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). UFRJ, 2005.

SCOPEL, E. Instituto de Química, Unicamp, 2019.

SIQUEIRA, L. M. - Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado. Orientador: Edson Luiz Silva. Tese de Mestrado - Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2008.

SOUSA, C. S. M.; BARATA, T. Q. F. Papelão: Composição, tipos, características, processos de fabricação e aplicações. Faculdade de arquitetura e urbanismo. Tecnologia da arquitetura. Materiais e processos de produção I, 2018.

SPRINGER, A. M.; NOLASCO, M. A.; PIRES, E. C. Uma Revisão sobre Aspectos Ambientais Relacionados aos Efluentes Líquidos das Indústrias de Celulose e Papel. O Papel. Setembro: p.70-75. 2000.

TAWFIK, A.; BAKR, M. H.; NASR, M.; HAIDER, J.; MASFER, M.K.; LIM, H.; QYYUM, M.A.; LAM, S.S. Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. Chemosphere, 2021.

TILHA, K. K.; CAMPOS, R. F. F.; KUHN, D. C.; PAGIORO, T. A. Análises de eficiência de uma estação de tratamento de efluente de celulose de papel no município de caçador – SC. Ignis, v.8, n.1, p 02-12, janeiro-abril/2019.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3a ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-DESA; Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. 2005.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. 1º ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-DESA da Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG.2002. 196p.

XAVIER CR, OÑATE E, MONDACA MA, CAMPOS JL, VIDAL (2011) Gladys Genotoxic effects of kraft pulp mill effluents treated by biological aerobic systems.



## **BIBLIOGRAFIA**

Carta Fabril, Co. Ltd., Brasil, 2021.

Jordan Paper and Cardboard Factories (JPCF), Co. Ltd, Zarka, Jordan, 2000.

SAAE – Serviço autônomo de água e esgoto. Sistemas de tratamento de Esgoto. Aracruz, Junho/2006.

Softys Brasil, Co. Ltd., Brasil, 2022.

WANG, S., LIU, H., GU, J., ZHANG, M., LIU, Y., 2022. Towards carbon neutrality and water sustainability: an integrated anaerobic fixed-film MBR-reverse osmosis-chlorination process for municipal wastewater reclamation. *Chemosphere* 287, 132060.

ZHANG, A.; SHEN, J.; NI, Y. Anaerobic Digestion for Use in the Pulp and Paper Industry and Other Sector: An Introductory Mini-Review. Peer-reviewed article. *Bioresources*, 2015.