

As UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

POLIANA CRISTINA DE OLIVEIRA BITTENCOURT

**Subsídios para análise da sustentabilidade da produção de  
papel reciclado em comparação a produção do papel de  
polpa virgem**

São Carlos

2013



POLIANA CRISTINA DE OLIVEIRA BITTENCOURT

**Subsídios para análise da sustentabilidade da produção de  
papel reciclado em comparação a produção do papel de  
polpa virgem**

Trabalho de graduação apresentado a Escola de  
Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo  
Para a obtenção do título de Engenheira Ambiental

Orientador  
Professor Doutor Eduardo Cleto Pires

São Carlos

2013

# FOLHA DE JUGAMENTO

---

Candidato(a): **Poliana Cristina de Oliveira Bittencourt**

Título da Monografia: **Levantamento Bibliográfico para a Análise da Sustentabilidade da Produção de Papel Reciclado em Comparação a Produção do Papel de Polpa Virgem**

Data da Defesa: 27/11/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires (Orientador(a))**

Aprovada - Dez.

**Prof. Dr. Valdir Schalch**

APROVADA - DEZ

**Prof. Dr. Rodrigo Córdoba**

APROVADA - DEZ

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação  
**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B624s      Bittencourt, Poliana Cristina de Oliveira  
              Subsídios para análise da sustentabilidade da  
              produção de papel reciclado em comparação a produção do  
              papel de polpa virgem / Poliana Cristina de Oliveira  
              Bittencourt; orientador Eduardo Cleto Pires. São  
              Carlos, 2013.

              Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
              Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
              São Paulo, 2013.

              1. Reciclagem do papel. 2. Sustentabilidade. 3.  
              Fabricação de papel. 4. Papel reciclado. I. Título.



Dedico este trabalho à minha mãe, Eloá, por ser minha grande provedora de conhecimentos, recursos, orientação e principalmente de amor.





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família.

À minha mãe, Eloá, por todo o amor, por todas as experiências compartilhadas, pelo apoio e suporte, que me proporcionaram essa experiência tão grande, que é poder estar e usufruir de tudo que a Universidade pode me oferecer.

Aos meus irmãos, Daniela, Vitor e Giovanna, por serem minhas fontes de inspiração, meus exemplos de pessoas preocupadas com a sociedade onde vivem, exemplos de profissionais apaixonados pelo que fazem e por serem meu suporte emocional.

Ao meu orientador, Eduardo Cleto Pires, por ser muito mais que o orientador desta pesquisa, por ser também uma pessoa de confiança dentro da Universidade e um profissional admirado.

Às amigas que construí dentro do ambiente universitário, que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos memoráveis e inenarráveis, especialmente a Mangá, a Danie, a Capeta, o Chiclete, a Teta, a Elisa e o Robinho.

Aos meus amigos de São José, Nicole, Gabriel, Louise e Diogo que cresceram comigo, amigos dos quais tenho orgulho por ter participado do desenvolvimento profissional e pessoal, acompanhado cada etapa, desde o colégio até os dias atuais.

À Universidade de São Paulo, por me proporcionar todo o conhecimento, tanto na Engenharia Ambiental quanto em relações sociais, em meus deveres como cidadã, a fim de construir uma sociedade mais igualitária e justa.

Às repúblicas que me acolheram, como moradora e agregada, Monte Pubis, Bufo, Chico Lopes, PB, Locomotiva, Sanjamaica, Disfarça, Tapa da Pantera, Sedução entre todas as outras que me ofereceram um cantinho de aconchego.



*“Por seres tão inventivo  
E pareceres contínuo  
Tempo tempo tempo tempo  
És um dos deuses mais lindos  
Tempo tempo tempo tempo...”*

Oração ao Tempo

Caetano Veloso



## RESUMO

BITTENCOURT, P.C.O. *Levantamento bibliográfico para a análise da sustentabilidade da produção de papel reciclado em comparação a produção do papel de polpa virgem*. 2013. 59p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Atualmente, há uma percepção positiva acerca de produtos reciclados. Tem-se a impressão que os produtos reciclados são sempre mais ambientalmente sustentáveis, principalmente porque diminuem os resíduos sólidos gerados e o consumo de matéria prima. Entretanto, será a reciclagem do papel um bom negócio para o meio ambiente no cenário nacional, tendo em vista que o Brasil possui uma vantagem na produção de florestas que fornecem fibras para a produção do papel de polpa virgem? Esta pesquisa tem como principal objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre a produção e reciclagem do papel, com a finalidade de analisar e comparar as entradas e saídas de ambos os processos, com foco em analisar os aspectos ambientais. Deste modo, foi possível verificar se a reciclagem do papel é mais ambientalmente sustentável quando comparada a produção do papel de polpa virgem. Ao contrário do que hoje em dia é comumente aceito, grande parte dos processos da reciclagem do papel é mais nociva ao meio ambiente.

Palavras chave: Reciclagem do papel. Sustentabilidade. Fabricação de papel. Papel reciclado.



## ABSTRACT

BITTENCOURT, P.C.O. *Bibliography for the sustainability analysis of producing recycled paper compared to the production of virgin pulp paper*. 2013. 59p.  
Monograph (Graduate Work in Environmental Engineering) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

Currently, there is a positive perception about recycled products. There's the impression that recycled products are always more environmentally sustainable, mainly because they decrease the solid waste and raw material consumption. However, is the paper's recycling process better for the environment on the national scenario, considering Brazilian ease in producing forests that provide fiber for the paper's production with virgin pulp? The main objective of this research is to conduct a bibliographic review about the production and the recycling paper process, in order to analyze and compare the inputs and outputs of both processes, focusing in environmental aspects. Thus, it was possible to verify if the paper recycling process is more environmentally sustainable if compared to the paper's production using virgin pulp. Contrary to what is commonly accepted nowadays, most of the paper recycling processes are more harmful to the environment.

Keywords: Paper recycling. Sustainability. Paper production. Recycled paper.





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - A Produção de Celulose de Fibra Curta, a Rotação e o Rendimento em diferentes países .	23
Tabela 2 - A Produção de Celulose de Fibra Longa, a Rotação e o Rendimento em diferentes países	24
Tabela 3 - Quantidade de produção florestal separada por estado brasileiro e PR espécies .....	26
Tabela 4 - DQO presente no efluente industrial em diferentes etapas do processo de fabricação do papel.....	32
Tabela 5 - Resultados do Setor de Produção de Papel em 2011 e 2012 em mil toneladas nos .....	35
Tabela 6 - Quantidade em mil toneladas de aparas e papéis reciclados no Brasil em 2011 .....	39
Tabela 7 - Efluente industrial do processo <i>deink</i> .....	46
Tabela 8 - Consumo de energia para a produção do papel em mil MJ por tonelada de papel .....	53
Tabela 9 - Consumo de água para a produção de papel em mil litros por tonelada de papel .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área Florestal necessária para a produção de 1 milhão de toneladas de celulose ao ano	
Fonte – BRACELPA (2013) .....	25
Figura 2 - Relação entre espécies de madeira e tipo de propriedades de cultivo .....	27
Figura 3 - Fluxograma do processo de produção do papel .....	30
Figura 4 - Consumo de Aparas sobre o consumo aparente de Papéis.....	37
Figura 5 - Fluxograma do processo de comercialização de aparas .....	38
Figura 6 - Modelo de entradas e saídas de um processo produtivo .....	41
Figura 7 - Entradas e Saídas do processo de reciclagem do papel.....	55

## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

ADT - Air-dried tonne

ANAP - Associação Nacional dos Aparistas de Papel

AOX - Adsorbable Organic Halogen

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel

CERFLOR – Certificação Florestal

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

FSC - Forest Stewardship Council

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPPC - International Plant Protection Convention

ISO - International Organization for Standardization

PEFC - Programme for the Endorsement of Forest Certification

UN - United Nations

USEPA – United States Environmental Protection Agency

VOC - Volatile Organic Compounds

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development ,1992

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	21
2. OBJETIVO .....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1 Cenário da Produção de Papel no Brasil .....	23
3.2 Produção de Celulose de Fibra Longa e Curta no Brasil e a Área Florestada .....	25
3.3 Certificações Florestais.....	27
3.4 A Produção do Papel .....	28
3.5 Principais aspectos e impactos ambientais do processo de produção de celulose e papel .....	30
3.5.1 Consumo de água e Geração de águas residuárias .....	31
3.5.2 Emissões Atmosféricas .....	32
3.5.3 Geração de Resíduos Sólidos .....	33
3.5.4 Consumo de Energia .....	33
3.5.5 O cenário da Produção de Papel de Polpa Virgem no Brasil.....	34
3.6 A Reciclagem do Papel.....	35
3.6.1 O Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem do Papel .....	35
3.6.2 Dificuldades da reciclagem de papel.....	39
4. METODOLOGIA .....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1 O uso da água na reciclagem do papel.....	44
5.2 O efluente industrial do processo de reciclagem do papel .....	45
5.3 Recursos energéticos e Emissões Atmosféricas na Reciclagem do Papel .....	48
5.4 A reciclagem do papel e os resíduos sólidos .....	51
5.5 Sumário de Impactos Ambientais da Reciclagem do Papel .....	52
5.6 A ecoeficiência do papel branco e do papel reciclado.....	52
6. CONCLUSÃO .....	56
REFERÊNCIAS .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

Será a fabricação de papel reciclado para escrever e imprimir sustentável do ponto de vista ambiental ou será apenas uma estratégia de marketing utilizada pelas indústrias, a fim de aumentar as vendas e, conseqüentemente, os lucros da empresa?

A ideia de desenvolvimento sustentável foi definida pelo relatório de Brundtland, sendo aquele desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras (WORD COMMISSION OF ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987). Neste contexto, nasce o termo “tripé da sustentabilidade”, criado por John Elkington, que aplica ao mundo corporativo a ideia de sustentabilidade relacionando questões sociais, ambientais e econômicas da empresa. De acordo com Flores, Araujo e Tybusch (2013), este “tripé” ganhou grande adesão no ramo empresarial, pois defende a possibilidade de maiores lucros juntamente com uma maior responsabilidade social através de uma política de resultados.

Este modelo “tripé” estimula os consumidores a sentirem maior responsabilidade quando forem escolher os produtos a serem adquiridos, optando muitas vezes por aqueles produtos de empresas que são supostamente mais sustentáveis (FLORES; ARAUJO; TYBUSCH, 2013). Atualmente, há uma percepção positiva acerca de produtos reciclados. Tem-se a impressão que os produtos reciclados são sempre mais ambientalmente sustentáveis, principalmente porque diminuem os resíduos sólidos gerados e o consumo de matéria prima. Entretanto, será a reciclagem do papel um bom negócio para o meio ambiente no cenário nacional, tendo em vista que o Brasil possui uma vantagem na produção de florestas que fornecem fibras para a produção do papel de polpa virgem?

Este trabalho demonstrará que a produção de papel de polpa virgem é mais sustentável do que a produção de papel reciclado.

## **2. OBJETIVO**

Levantamento bibliográfico sobre a produção e reciclagem do papel, com a finalidade de analisar e comparar as entradas e saídas de ambos os processos, focando em analisar aspectos e impactos ambientais. Concluindo, através da metodologia utilizada, se a reciclagem do papel é mais ambientalmente sustentável, quando comparada a produção do papel de polpa virgem.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cenário da Produção de Papel no Brasil

De acordo com a Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA (2013), atualmente o Brasil possui 220 empresas com atividade em 540 municípios, em 18 Estados. A área de florestas plantadas para fins industriais no Brasil é de 2,2 milhões de hectares, o que representa 0,8% do território nacional. A produção de celulose e de papel no Brasil gera 128 mil empregos diretos, sendo 77 mil na indústria e 51 mil em florestas, e 640 mil empregos diretos. Os impostos destinados aos cofres públicos em 2011 foram de R\$3,5 bilhões. O Brasil é o 4º maior produtor de celulose no mundo e o 9º maior produtor de papel.

A base florestal brasileira de plantação de árvores de rápido crescimento é uma referência mundial. Primeiramente porque o potencial brasileiro de produção é de 70 m<sup>3</sup>/ha/ano, um valor muito acima dos demais países emergentes, como o Chile e Uruguai (BRACELPA). Nota-se o porquê desta diferença quando se compara a rotação (tempo médio da plantação à colheita) e rendimento da plantação de espécies de celulose de fibra curta e longa, como mostrado nas Tabelas 1 e 2

Tabela 1 - A Produção de Celulose de Fibra Curta, a Rotação e o Rendimento em diferentes países

Espécies	Países	Rotação (anos)	Rendimento m <sup>3</sup> /ha/ano
Eucalipto	Brasil	7	44
Eucalipto	África do Sul	8-10	20
Eucalipto	Chile	10-12	25
Eucalipto	Portugal	12-15	12
Eucalipto	Espanha	12-15	10
Bétula	Suécia	35-40	6
Bétula	Finlândia	35-40	4

Fonte – BRACELPA (2013)

Tabela 2 - A Produção de Celulose de Fibra Longa, a Rotação e o Rendimento em diferentes países

Espécies	Países	Rotação (anos)	Rendimento m <sup>3</sup> /ha/ano
Pinus spp	Brasil	15	38
Pinus radiata	Chile	25	22
Pinus radiata	Nova Zelândia	25	22
Pinus elliottii / taeda	Estados Unidos	25	10
Pinus de Oregon	Canadá (costa)	45	7
Picea abies	Suécia	70-80	4
Picea abies	Finlândia	70-80	4
Picea glauca	Canadá (interior)	55	3
Picea mariana	Canadá (leste)	90	2

Fonte – BRACELPA (2013)

Um dos pontos estudados nesta pesquisa é se estamos seguindo um modelo não apropriado ao cenário brasileiro na reciclagem do papel, usando como base pesquisas e referências europeias e americanas. Nota-se que a produção de florestas de fibras longas e curtas no Brasil é muito mais eficiente, do ponto de vista de tempo de cultivo até a colheita, se comparado ao resto do mundo.

O gráfico da Figura 1 apresenta a relação entre área florestal em hectares (ha) necessária para a produção de 1,0 milhão de toneladas de celulose ao ano. Percebe-se que o potencial brasileiro de produção de celulose, de fato, se destaca se comparado a, por exemplo, Península Ibérica.



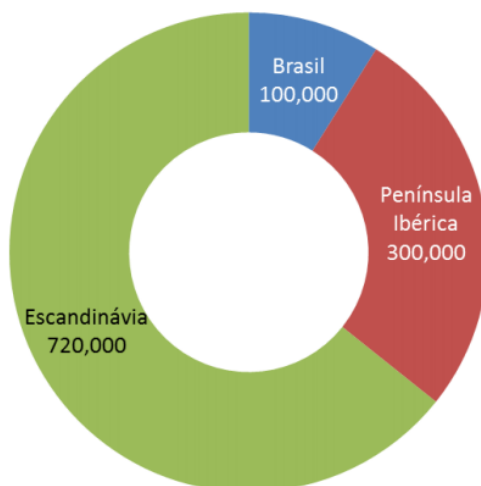


Figura 1 - Área Florestal necessária para a produção de 1 milhão de toneladas de celulose ao ano  
Fonte – BRACELPA (2013)

Observando os dados apresentados acima, pode-se comparar o tempo de rotação (tempo médio do plantio à colheita) e o rendimento, que é apresentado em metros cúbicos por hectares por ano, entre o Brasil e outros diversos países que também se destacam no ramo, como o Chile e a África do Sul. Para a produção de florestas de árvores de fibra curta nota-se uma vantagem no tempo de rotação de 1 a 3 anos no cenário brasileiro a frente do segundo colocado, a África do Sul. Com relação ao Rendimento, a produção de Eucalipto no Brasil possui uma eficiência muito acima da África do Sul, sendo 44 m<sup>3</sup>/ha/ano e 20 m<sup>3</sup>/ha/ano no Brasil e na África do Sul, respectivamente.

Na produção de florestas de árvores de fibra longa também pode-se notar uma vantagem brasileira quando comparado a outros países produtores. No Brasil, o tempo de Rotação médio é de 15 anos enquanto no Chile é de 25 anos e o Rendimento Brasileiro é 72% maior.

### 3.2 Produção de Celulose de Fibra Longa e Curta no Brasil e a Área Florestada

A produção total de Celulose no Brasil em 2011 foi de 13.922.000 toneladas e em 2012 foi de 13.977.000 toneladas, apresentando um crescimento de 0,4% em 2012. O Brasil destaca-se na produção de fibra curta, representando quase 85% da

produção brasileira de celulose em 2012, com 11.845.000 toneladas (BRACELPA 2013).

Toda a celulose produzida no Brasil é proveniente de florestas plantadas de pinus e eucalipto. De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), a produção dessas duas espécies ocupa 2,2 milhões de hectares do território nacional. Há uma estimativa de investimento de R\$ 20 milhões no setor, para que nos próximos 10 anos haja um crescimento da área plantada de 45%, atingindo 3,2 milhões de hectares de plantio de pinus e eucalipto (RELATÓRIO FLORESTAL BRACELPA, 2010). Este aumento da área plantada visa aumentar em 57% a produção de Celulose dentro dos próximos 10 anos, atingindo uma produção anual em 2020 de 12,7 milhões de toneladas.

Tabela 3 mostra a produção de Áreas Plantadas no Brasil, em mil hectares, separadas por Estado:

Tabela 3 - Quantidade de produção florestal separada por estado brasileiro e PR espécies

Estados	Eucalipto	Pinus	Outras	Total
Amapá	12	0	0	12
Bahia	439	83	0	522
Espírito Santo	136	0	0	136
Maranhão	67	0	0	67
Mato Grosso	1	0	0	1
Mato Grosso do Sul	158	0	0	158
Minas Gerais	200	3	1	204
Pará	49	0	0	49
Paraná	112	148	3	263
Piauí	30	0	0	30
Rio de Janeiro	2	0	0	2
Rio Grande do Sul	189	11	4	204
Santa Catarina	17	125	1	143
São Paulo	371	34	0	405
<b>TOTAL</b>	<b>1.783</b>	<b>404</b>	<b>9</b>	<b>2.196</b>

Fonte – BRACELPA (2010)

Esta tabela extraída do Relatório Florestal da BRACELPA em 2010, mostra que os 5 principais Estados produtores de florestas plantadas para a produção de celulose representam 72,8% de toda a área de plantação nacional, sendo eles: Bahia, São

Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. No Brasil, 81% de toda a produção nacional é relativa a produção de Eucalipto, 18% é de pinus e apenas 1% é relativa à outras espécies.

Também neste Relatório Florestal, nota-se que existem 3 diferentes tipos de propriedades para a plantação de pinus e eucalipto, sendo elas: propriedade própria, arrendamento ou parceria e fomento. Cada uma representa no cenário nacional, respectivamente, 1.566 mil ha, 253 mil ha e 377 mil ha.

A relação entre espécie plantada e tipo de propriedade pode ser observada no gráfico abaixo:

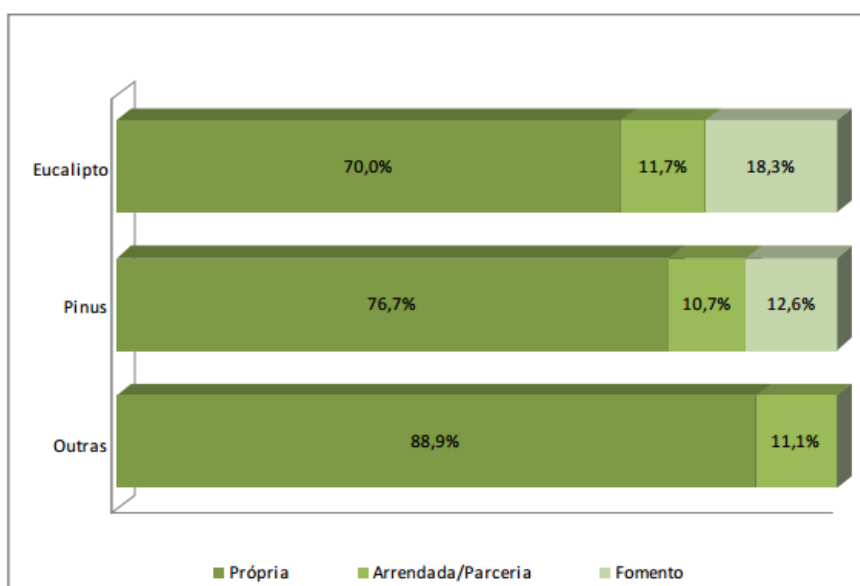


Figura 2 - Relação entre espécies de madeira e tipo de propriedades de cultivo  
Fonte – BRACELPA (2010)

### 3.3 Certificações Florestais

As certificações funcionam como uma ferramenta no setor florestal que visa garantir boas práticas de manejo aos seus clientes e consumidores. Ou seja, as certificações são baseadas em políticas e padrões a serem seguidos de forma que a gestão dos recursos naturais gerem menores impactos ambientais e tragam mais benefícios para a sociedade e meio ambiente.

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, o INMETRO, “a certificação florestal voluntária vem se desenvolvendo desde a década de 80, contando com vários sistemas operando e competindo entre si.” O INMETRO também destaca os dois principais órgãos certificadores, sendo eles a *Forest Stewardship Council* (FSC) e *Programme for the Endorsement of Forest Certification* (PEFC). Em 1996, no Brasil, surgiu um programa voluntário chamado CERFLOR, que é uma parceria entre a Sociedade Brasileira de Silvicultura e algumas associações do setor, com o apoio do Governo, estabelecendo uma relação com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). De acordo com a ABNT, a certificação ISO 14001 visa “a melhoria contínua do desempenho ambiental, controlando insumos e matérias-primas que representem desperdícios de recursos naturais.”.

A BRACELPA divulga que da área plantada para a produção de celulose 1.260 mil hectares possuem certificado CERFLOR, 1.489 mil hectares possuem certificação FSC e 83 mil hectares possuem ISO 14001. Ou seja, como a área total em 2012 de florestas plantadas no Brasil foi de 2.196 mil hectares a área certificada representa 100% do total plantado.

### **3.4 A Produção do Papel**

O papel é produzido através do beneficiamento da madeira e também pode ser recuperada através das aparas de papel e da reciclagem pós-uso, bem como de outros materiais fibrosos, apesar de ser incomum.

Dependendo da finalidade do papel, a celulose passa por tratamentos especiais antes de ser processada. O papelão, por exemplo, é muito utilizado como embalagem, por este motivo ele deve apresentar uma característica muito diferente do papel para escrever, sendo mais rígido e resistente.

Para preparar a celulose para fabricação do papel, este material, que chega em placas é processado em um equipamento chamado “hidrapulper”, no qual a celulose é hidratada e misturada de forma a gerar uma massa pastosa. Esta massa pode ser submetida a diferentes processos, dependendo das especificações deste papel,

podendo ser tingida, podendo também ter suas fibras quebradas em menores pedaços, o que dá uma característica mais uniforme e resistente da folha de papel, por exemplo.

A máquina de papel apresenta duas principais etapas, sendo a primeira chamada de úmida e a outra, seca. Nesta primeira etapa, a folha de papel é formada e grande quantidade de água é separada das fibras. Na segunda etapa, a folha passa por um processo maior de secagem e de prensa, através de diversos cilindros em alta temperatura. No final da segunda etapa, a folha ainda pode passar pela calandragem, desta forma ela atinge seus requisitos de lisura e brilho, dependendo do tipo de uso deste papel. Ao final da calandragem, o papel é rebobinado e destinado aos seus diversos tipos de usos finais.

Na etapa úmida, em ambos os processos (polpa virgem e reciclada), após a depuração a massa é distribuída uniformemente por uma mesa plana e em seguida um equipamento formará a folha de papel, através do uso de caixas de vácuo e telas que tem a finalidade de diminuir a porcentagem de água no material.

Na etapa seca, a folha de papel ainda com alta porcentagem de água passa por rolos aquecidos com injeção de vapor, que tem a finalidade de abaixar ainda mais esta porcentagem, desta forma, o papel fica com a umidade necessária para a sua especificação e segue para a enroladeira.

Para a recuperação das fibras para a reciclagem de papel, é acrescentado uma etapa antes de o material ser enviado para o hidrapulper. Esta etapa é denominada pré-depuração, no qual a finalidade é a remoção de impurezas que podem vir junto com o papel a ser reciclado, tais quais grampos, arames, cliques, plásticos, etc. (GALLON, 2008). Após o material ser transformado em massa pelo hidrapulper ele será enviado através de bombas por tubulações para o processo de depuração, no qual serão retiradas as impurezas menores, como areia, pedaços pequenos de plásticos, palitos, isopor, etc.

A enroladeira é composta por um rolo e braços pneumáticos (GALLON, 2008). Com o papel pronto e enrolado, ele já poderá ser enviado para o rebobinamento, onde o papel será cortado e pesado de acordo com os requisitos de qualidade. Os

requisitos são: gramatura, rigidez, umidade e cobb (quantidade de água que o papel pode absorver).

A Figura 3 mostra um fluxograma do processo de fabricação do papel.

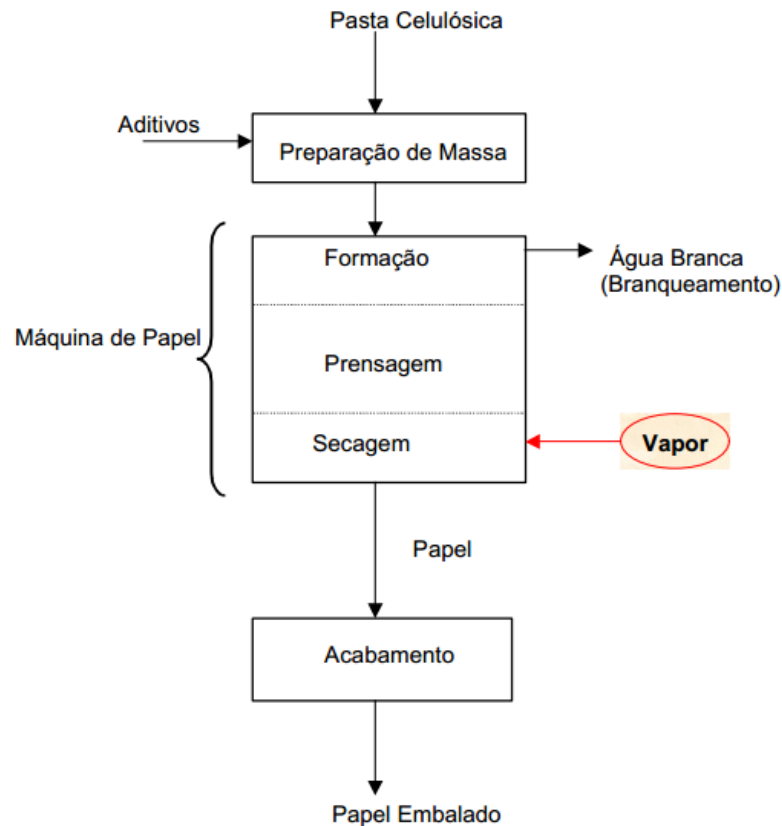


Figura 3 - Fluxograma do processo de produção do papel  
Fonte - GALLON (2008)

### 3.5 Principais aspectos e impactos ambientais do processo de produção de celulose e papel

Atualmente, os principais aspectos ambientais relacionados com a produção de celulose são as águas residuárias (efluente), resíduos sólidos e as emissões atmosféricas (INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL - IPPC<sup>1</sup>, 2000 apud PIOTTO, 2003). Entretanto, pode-se citar outros aspectos ambientais tais como o consumo da madeira, o consumo de água, condensados provenientes do

<sup>1</sup> INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL. **Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry**. Sevilha: European Commission, 2000.

processo de cozimento e evaporação na preparação da celulose, as perdas acidentais de licor negro (fluido processual produzido à saída do digestor, um elemento que é responsável pela cozedura da madeira para retirar componentes indesejáveis ao processo de fabricação do papel) e fibras, a emissão de compostos orgânicos clorados, geração de ruído, entre outros (PIOTTO, 2003).

### **3.5.1 Consumo de água e Geração de águas residuárias**

O consumo de água na indústria de celulose pode variar significativamente, podendo atingir taxas de 50 m<sup>3</sup> de água por tonelada de celulose produzida, considerando a água utilizada para a refrigeração. Entretanto, este número pode baixar consideravelmente se a água for reutilizada dentro do processo de fabricação e se forem utilizados equipamentos mais eficientes (HOGLIND, 1999).

De acordo com Piotto (2003), as águas residuárias são tipicamente caracterizadas por substâncias orgânicas, sendo medidas as concentrações através da determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). A água residuária proveniente do branqueamento (que é realizado à base de compostos de cloro) é rica em compostos organoclorados, conhecidos como AOX (Adsorbable Organic Halogen).

“O volume de água utilizado tem relação direta com a geração/emissão de águas residuárias, entretanto o potencial poluidor é dependente da operação da fábrica e do grau de fechamento de circuitos” (PIOTTO, 2003).

A perda de licor negro por derramamento também é um fator a ser considerado no tratamento das águas residuárias, pois contem grandes concentrações de produtos químicos, aumentando consideravelmente a carga orgânica deste efluente.

A Tabela 4 mostra valores típicos de DQO no efluente em diferentes etapas do processo

Tabela 4 - DQO presente no efluente industrial em diferentes etapas do processo de fabricação do papel

Estágio/processo	DQO (kgO <sub>2</sub> /ADT)
Preparo de madeira	1 a 10
Condensados	2 a 8
Derrames	2 a 10
Perdas na lavagem	6 a 12
Branqueamento	15 a 65
<b>Total</b>	<b>31 a 105</b>

ADT: tonelada de polpa seca ao ar (air dried tonne)

Fonte – IPPC (2000)

### 3.5.2 Emissões Atmosféricas

Pode-se destacar como sendo as principais áreas de emissões atmosféricas o preparo da madeira, o cozimento, a lavagem da polpa, o branqueamento, as caldeiras de recuperação de produtos químicos e de biomassa e a secagem da polpa, sendo comum a emissão dos seguintes componentes: TRS, material particulado, compostos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e compostos orgânicos voláteis (VOC na sigla em inglês) (PIOTTO, 2003).

A maior fonte de emissão atmosférica de uma indústria de celulose é a caldeira de recuperação, emitindo enxofre, material particulados, TRS e NO<sub>x</sub>. No forno de cal é emitido grande quantidade de material particulado, tais quais óxidos de nitrogênio, TRS e dióxido de enxofre (PIOTTO 2003).

O processo de cozimento da madeira gera condensados com concentrações de DQO e DBO em torno de 20 a 30 kgO<sub>2</sub>/ADT e 7 a 10 kgO<sub>2</sub>/ADT, respectivamente, sendo ADT sigla para Air-dried tonne, ou seja, tonelada de polpa seca ao ar. Este condensado é composto principalmente por metanol e etanol, entretanto, contém também outros contaminantes, tais quais cetonas, terpenos, fenóis e outros compostos orgânicos. São comuns os tratamentos “stripping” ou arraste a este condensado, removendo cerca de 90% de todos os poluentes (PIOTTO, 2003).



### 3.5.3 Geração de Resíduos Sólidos

A geração de resíduos sólidos dentro da planta de uma indústria é papel e celulose é muito diversificada, com resíduos orgânicos e inorgânicos, de diferentes classes. Alguns desses resíduos podem até mesmo serem reutilizados na fábrica, por exemplo, o lodo primário da estação de tratamento de efluentes é rico em fibras, que podem ser incineradas com a finalidade de produzir energia para a própria fábrica (HARILA; KIVILINNA<sup>2</sup> apud PIOTTO, 2003). Outro exemplo de resíduo reutilizado são as cinzas provenientes da queima de resíduos orgânicos, que podem ser utilizadas como adubos em plantações de pinus e eucalipto.

De acordo com Piotto (2003), apesar de o lodo primário ser de, consideravelmente, fácil tratamento, o lodo secundário, ou biológico, é de difícil desidratação, sendo feito em várias etapas, começando pelo adensamento seguido pelo condicionamento e em seguida, a desidratação.

Além da geração de resíduos na estação de tratamento de efluentes, a indústria de papel e celulose gera resíduos inorgânicos nos fornos de cal, principalmente. Não deve ser esquecido que há desperdícios durante a produção, gerando resíduos de madeira, de papel, resíduos do escritório, resíduos da caldeira de recuperação (dregs), entre outros.

### 3.5.4 Consumo de Energia

O consumo de energia na indústria de celulose e papel é muito dependente da tecnologia que é usada para os processos produtivos. Porém, resumidamente, pode-se citar como principais consumidores de energia os seguintes processos: Aquecimento, transporte e evaporação de fluidos, reações químicas no cozimento e branqueamento e bombeamento dos fluidos.

---

<sup>2</sup> HARILA, P.; KIVILINNA, A. Biosludge Incineration in a recovery boiler. **Water Science and Technology**, Oxford, v.40, n.11/12, 1999.

Como já observado, muitas indústrias utilizam seus resíduos para geração de energia. Desta forma, apesar de o processo de fabricação de celulose ser um grande consumidor de energia, grande parte desta é produzida através da queima de subprodutos oriundos de fontes renováveis. Entretanto, alguns processos produtivos requerem o uso de combustíveis fósseis, como por exemplo, o uso de óleo no forno de cal (PIOTTO, 2003).

### **3.5.5 O cenário da Produção de Papel de Polpa Virgem no Brasil**

O Brasil é o nono país com maior produção de papel no mundo e o quarto produtor de celulose. Isto se dá porque há uma exportação massiva de celulose, enquanto a exportação de papel é menor se comparada à da polpa virgem. De acordo com a BRACELPA (2013), a exportação de celulose brasileira foi de 4.888.000 toneladas, de janeiro a julho de 2012, o que representa 61% de toda a produção nacional. A exportação de papel no mesmo período foi de 1.175.000 toneladas, 20% da produção nacional. Em todo o ano de 2012, essas importações somaram 6.657 milhões de dólares na balança comercial brasileira.

Os principais tipos de papéis produzidos no Brasil são: embalagem, imprimir e escrever, imprensa, fins sanitários e papel cartão. A tabela abaixo apresenta a produção total de papel no Brasil e o consumo doméstico, separando o papel por tipo.

Tabela 5 - Resultados do Setor de Produção de Papel em 2011 e 2012 em mil toneladas

<b>Papel / Paper</b>	<b>Total 2011</b>	<b>Total 2012*</b>
<b>Produção / Production</b>	<b>10.159</b>	<b>10.260</b>
Embalagem / Packaging & Wrapping	5.168	5.210
Imprimir e Escrever / Printing & Writing	2.680	2.634
Imprensa/ Newsprint	129	131
Fins Sanitários / Tissue	961	1.040
Papelcartão / Cardboard	733	761
Outros / Other	488	484
<b>Vendas Domésticas / Domestic Sales</b>	<b>5.290</b>	<b>5.556</b>
Embalagem / Packaging & Wrapping	1.681	1.763
Imprimir e Escrever / Printing & Writing	1.630	1.690
Imprensa/ Newsprint	121	132
Fins Sanitários / Tissue	933	1.027
Papelcartão / Cardboard	512	531
Outros / Other	413	413

\*Dados de produção e vendas domésticas em 2012 foram revisados.

Fonte – BRACELPA (2013)

## 3.6 A Reciclagem do Papel

### 3.6.1 O Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem do Papel

O conceito de desenvolvimento sustentável dado pelo norueguês Dr. John R. Ehrenfeld, também criador do conceito de Ecologia Industrial é:

O desenvolvimento conduzido responsavelmente por indivíduos, empresas, governos e outras instituições, cuidando do futuro como se ele lhes pertencesse, dividindo e partilhando equitativamente os recursos naturais dos quais os seres humanos e as demais espécies dependem, de forma a garantir que aqueles que hoje existem estejam presentes também no futuro para satisfazer as necessidades e aspirações humanas (EHRENFELD, 2001).

No contexto econômico atual, os consumidores têm uma postura mais rígida com relação à interação com organizações, exigindo uma boa imagem institucional, mais ética e que seja mais ecologicamente responsável. Neste contexto, nota-se um debate muito atual sobre o desenvolvimento sustentável das empresas. De acordo

com Ribeiro et al.<sup>3</sup> (2012 apud GALLON et al., 2008), a incorporação deste conceito, desenvolvimento sustentável, no meio empresarial deve ao menos amenizar a degradação do meio ambiente, se não excluí-lo por completo. Este autor também defende que este conceito também visa reduzir os custos de produção e melhorar o fluxo de rendimento para a empresa. Desta maneira, as indústrias enxergam atualmente a variável ambiental como um fator de competitividade no mercado.

Tendo em vista que o assunto “meio ambiente” está em destaque no meio empresarial, dada sua importância econômica tanto do ponto de vista de melhor os fluxos da produção quanto na competitividade no mercado, passou-se a dar maior ênfase à Gestão Ambiental empresarial. Percebe-se esta relação entre o meio ambiente e o fator ambiental na administração neste trecho descrito por Nilsson (1998), “A gestão ambiental pode se tornar também um importante instrumento para as organizações em suas relações com consumidores, o público em geral, companhias de seguro, agências governamentais, etc.”.

Já se observou neste trabalho que praticamente todo o papel produzido no Brasil tem como origem a celulose de florestas plantadas de pinus e eucalipto, ou seja, recursos renováveis. Após o uso, se este papel estiver conservado adequadamente para a reciclagem, a fibra poderá ser reciclada para a produção de novos papeis. Entretanto, este processo de reciclagem da fibra é finito, pois a cada ciclo a fibra perde um pouco de suas propriedades essenciais para serem transformadas em papel, como, por exemplo, a sua resistência.

Percebe-se, então, que do ponto de vista de uso de recursos naturais renováveis, como é o caso da fibra utilizada na produção de celulose, à primeira vista nota-se uma vantagem em reciclar a fibra proveniente do papel em seus diferentes usos. Entretanto nota-se a necessidade de analisar se o balanço material e energético do processo de reciclagem é mais baixo que do processo de produção de papel com polpa virgem e seus custos e benefícios sociais relacionados a ambos os processos.

---

<sup>3</sup> RIBEIRO, D.P.S. et al. **A Ecoeficiência do papel branco versu o papel reciclado**. Campinas: Unicamp, 2012.

O papel é um dos produtos mais reciclados no Brasil, que acontece desde a década de 30 (MACEDO e VALENÇA, 1997). De acordo com a BRACELPA (2013), a taxa de recuperação de aparas (papel que não foi para o comércio e pode ser reciclado, sem antes ter sido utilizado) em 2011 foi de 45,5% de todo o papel que circulou no país, Figura 4. Além disso, há uma quantidade considerável de papel que é destinada a outros usos após seu descarte que não são computados nessa taxa de reciclagem, como na produção de telhas com aparas. Considera-se também para o cálculo desta taxa os papéis que não são passíveis de recuperação, como os higiênicos, que são contaminados.

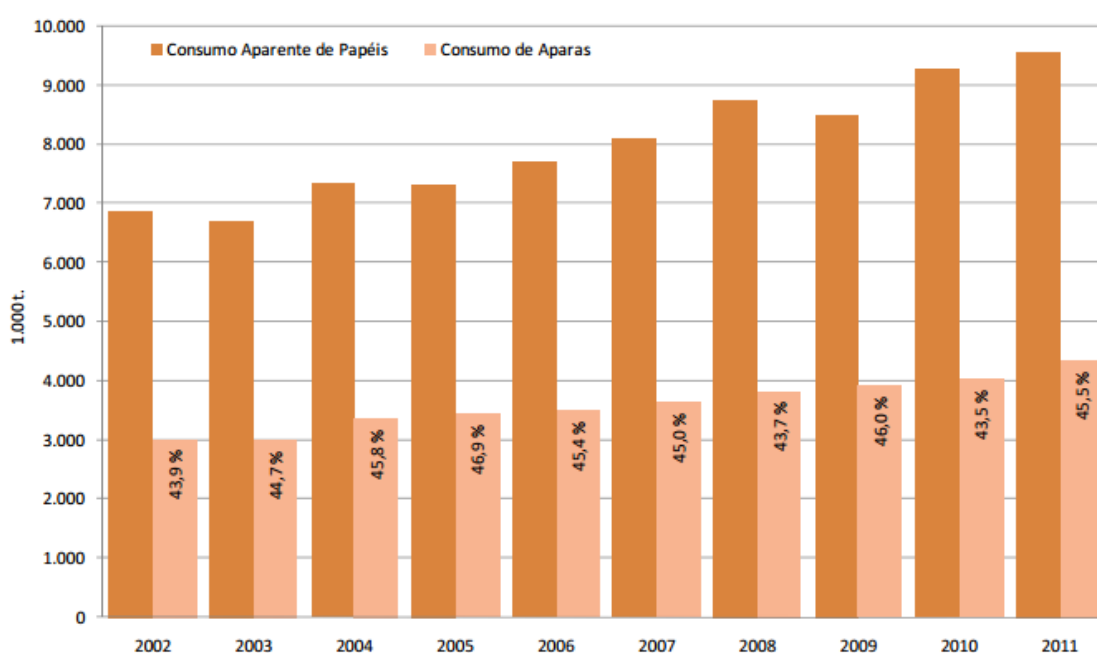


Figura 4 - Consumo de Aparas sobre o consumo aparente de Papéis  
Fonte – BRACELPA (2013)

No cenário brasileiro, a coleta de papel para a reciclagem cresceu 78%, enquanto a produção mundial de papel de polpa virgem aumentou cerca de 40%, sendo na América Latina o crescimento de 46%, de acordo com MACEDO e VALENÇA (1997).

A reciclagem do papel também inclui a criação de empregos formais e informais, podendo ser desde os catadores e aparistas até as pessoas que trabalham no processo industrial de reciclagem. No Brasil, a coleta de material para reciclagem é feita, principalmente, por pessoas físicas de baixo poder aquisitivo em áreas de grande concentração populacional. Na década de 90, 70% dos associados da

Associação Nacional dos Aparistas de Papel (Anap) estavam localizados no Estado de São Paulo. A coleta é realizada tanto em áreas comerciais quanto residenciais. (MACEDO e VALENÇA, 1997).

A Figura 5 mostra um fluxograma do processo de comercialização de aparas, disponível no site da Anap:

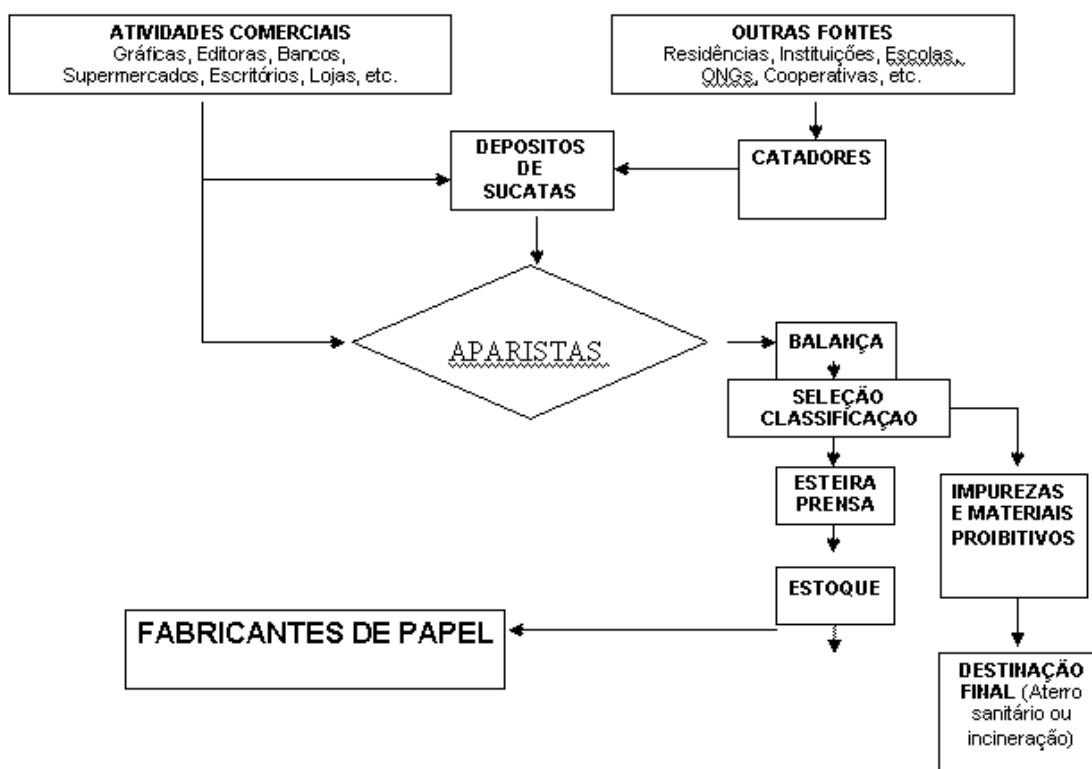


Figura 5 - Fluxograma do processo de comercialização de aparas  
Fonte – ANAP (2013)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT NBR 15755:2009), para classificar o papel como reciclado, ele deve conter no mínimo 50% de fibras recuperadas. Desses 50% de material recuperado, no mínimo 50% deve ser pós-consumo, ou seja, no mínimo 25% do papel reciclado devem ser aquele que foi utilizado pelo consumidor e em seguida recuperado para a reciclagem. Entretanto, o papel reciclado pode conter até 50% de fibras virgens.

Na tabela 6 pode-se observar a quantidade em mil toneladas de aparas e papéis reciclados em 2011 e a taxa de recuperação por tipo de papel:

Tabela 6 - Quantidade em mil toneladas de aparas e papéis reciclados no Brasil em 2011

Família de Aparas	Consumo Aparente de Aparas	Consumo Aparente de Papéis de Origem*	Taxa de Recuperação
Ondulados + Kraft	3.393	4.626	73,3%
Imprimir / Escrever	600	2.081	28,8%
Imprimir / Escrever com Pastas	189	862	21,9%
Papelcartão/Cartolinas	166	572	29,0%
Sanitários	-	962	-
Especiais	-	459	-
<b>Total</b>	<b>4.348</b>	<b>9.562</b>	<b>45,5%</b>
<b>Total sem Papéis Não Recicláveis</b>	<b>4.348</b>	<b>8.141</b>	<b>53,4%</b>

\* Estimado

Fonte – BRACELPA (2013)

Nota-se uma taxa de recuperação de papéis ondulados e Kraft muito acima dos demais tipos de papel, representando 73% dos 45,5% de recuperação de aparas. Esta grande porcentagem se dá por dois principais motivos: Primeiramente porque os papéis ondulados e Kraft possuem um acabamento inferior aos demais tipos de papéis, o que facilita a remoção das fibras para realizar a reciclagem. Outro motivo é que os papéis ondulados são amplamente utilizados para embalar produtos que vão para o comércio, tais quais eletrodomésticos e móveis, em grande volume e seu uso, muitas vezes, se restringe a esta finalidade. Desta maneira, assim que o produto é desembalado, o papel já retorna para os catadores e aparistas. Os consumidores não usualmente irão manter esses papéis em suas casas/comércio.

Os papéis sanitários não são reciclados porque possuem muitos patogênicos. Desta forma, são destinados ao tratamento fim de tubo, como os aterros sanitários.

### 3.6.2 Dificuldades da reciclagem de papel

Essencialmente, as fibras estão contaminadas, usadas. A qualidade da polpa reciclada é diretamente afetada pela “história” desta fibra, por exemplo, pela sua origem, processos e tratamentos, ou seja, por estes cinco aspectos:

1. O histórico do processo de produção da celulose;
2. O histórico do processo de produção do papel;
3. O histórico do uso de tinta sobre o papel;
4. O histórico do tempo em uso deste papel
5. O histórico de reciclagem deste papel.

Em cada um desses períodos, alguns fatores afetam a qualidade da polpa reciclada, cada um com sua devida influência no processo de reciclagem (MCKINNEY, 1995).



## 4. METODOLOGIA

Sendo um assunto bem difundido no meio acadêmico, o princípio de conservação de massa é de extrema importância para a elaboração deste trabalho. Antoine Lavoisier tornou conhecido o que chamamos de Lei de Lavoisier, na qual ele mostra que a matéria é apenas passível de transformação, a partir de uma forma para outra através de processos físico-químicos, sendo impossível de se criar ou desaparecer uma matéria espontaneamente.

Para determinar se a produção de papel reciclado é mais sustentável do ponto de vista ambiental se comparada à produção de papel de polpa virgem, será feito um levantamento do balanço material e energético de ambos os processos utilizando o modelo proposto por Chehebe (1988) que se encontra no fluxograma abaixo, analisando principalmente os seguintes aspectos:

- Volume de água utilizado;
- Quantidade de energia elétrica necessária;
- Volume de efluente gerado;
- Poluentes gerados.

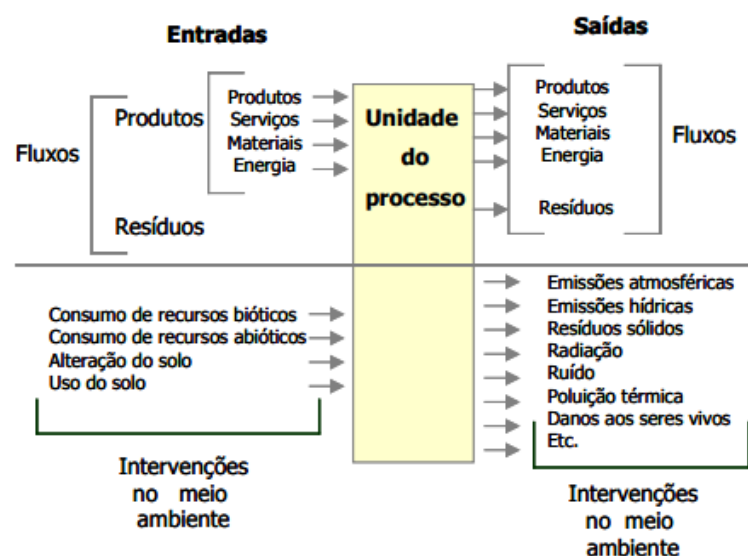


Figura 6 - Modelo de entradas e saídas de um processo produtivo  
Fonte – Chehebe (1988)

Depois de realizada a análise de entradas e saídas tanto para a produção de papel de polpa virgem quanto para a produção a partir de polpa reciclada, será feita uma comparação entre os dois processos a fim de se observar as consequências ambientais da produção de cada um, avaliando a sustentabilidade do processo de reciclagem do papel.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cerca de 1.5 milhões de toneladas, 15% de todo o papel reciclado no mundo é tratado com produtos químicos específicos para o processo *deink* (este termo em inglês representa a etapa de remoção de tinta do papel reciclado). Os produtos químicos são adicionados ao processo de forma a acelerar o processo *deink*, melhorando o resultado se comparado à remoção mecânica, entretanto, este processo representa o maior uso de químicos no processo de reciclagem (MCKINNEY, 1995).

No processo *deink*, a maioria dos químicos utilizados são surfactantes e solventes. Pode-se citar alguns químicos utilizados para remover a tinta do papel, tais como sais de cálcio, peróxido de hidrogênio, silicato de sódio, fosfato, carbonato, borato, ácido sulfúrico, hidrosulfito de sódio, entre outros, sendo muito comumente utilizado também o hidróxido de sódio. Neste processo a tinta do papel é separada da fibra superficial e é quebrada em partes com diâmetro entre 1 e 10µm, aproximadamente. Em seguida, esta partícula ficará suspensa na água e logo removida junto com a água, durante o processo de secagem (MCKINNEY, 1995).

O processo *deink* pode resultar em alguns problemas, devido ao uso de surfactantes. Primeiramente, o volume de água residuária do processo irá aumentar consideravelmente com o *deink* e esta água é tratada através do uso de floculantes químicos. A natureza dispersiva do surfactante pode prejudicar a eficiência do uso de floculantes. Outro problema a ser considerado é que se o surfactante não for bem removido da polpa reciclada, esta não irá apresentar a qualidade esperada, pois prejudicaria o uso de tinta e cola neste papel reciclado.

Outro processo importante para a reciclagem industrial do papel é a etapa de branqueamento, que também está presente na produção de papel de polpa virgem. Para o branqueamento de polpa reciclada, são utilizados processos de oxi-redução, sendo comumente utilizado o peróxido de hidrogênio, entretanto pode-se utilizar oxigênio e ozônio também. A vantagem de se utilizar o peróxido de hidrogênio é que este produto não é muito agressivo ao meio ambiente, pois após o seu uso, ele se transforma em água e oxigênio.

Para o branqueamento de polpa mista (virgem e reciclada), o processo de branqueamento utilizado é o mesmo que para a produção de papel proveniente de polpa virgem. No Brasil, bem como já citado anteriormente, para classificar o papel como reciclado, ele deverá conter no máximo 50% de polpa crua e no mínimo 50% de polpa reciclada, ou seja, o processo de branqueamento será idêntico ao da produção de papel de polpa crua.

### **5.1 O uso da água na reciclagem do papel**

Desde a década de 80 que indústrias buscam desenvolver um processo de reciclagem de papel que não utilize água. A Kimberly Clark Corporation tentou implantar um modelo de reciclagem a seco, entretanto o papel não conseguiu atingir a qualidade necessária e a empresa optou por retornar ao modelo de reciclagem convencional, com o uso de água, considerando então este modelo de reciclagem a seco elusivo.

Além de necessitar de água no processo *deink*, o papel é essencialmente uma rede de fibras de celulose que é fixa porque é unida por pontes de hidrogênio quando o papel está seco, que são substituídas por moléculas de água quando esta rede é molhada. Para a reciclagem do papel é necessário separar essas fibras sem quebrá-las, sendo imprescindível o uso da água para esta separação (MCKINNEY, 1995). Além deste uso para a água na reciclagem, a água também é essencial como meio de transporte das fibras e auxilia na remoção de impurezas, como cola e tinta.

De acordo com McKinney (1995) o uso da água na reciclagem de papel pode variar muito, dependendo de alguns fatores, tais como:

- Tipo de papel a ser reciclado;
- Tipo de papel a ser produzido;
- Reciclagem da água dentro da própria fábrica;
- Disponibilidade e custo da água;
- Perda de água no processo de reciclagem;
- Qualidade do tratamento de água.

Para um processo simples de reciclagem de polpa, considera-se o uso de  $2\text{m}^3$  de água para cada tonelada de polpa reciclada. Para um processo de reciclagem mais complexo, este valor pode ser o dobro,  $4\text{m}^3$  de água por tonelada.

Segundo McKinney (1995), as fábricas europeias de papel, que realizam também a reciclagem, apresentam boas práticas de consumo de água, considerando o reciclo de água no processo, valores típicos de volume de água por tonelada de papel com diferentes especificações, como apresentado abaixo:

- Embalagens:  $6-8\text{ m}^3/\text{t}$ ;
- Jornal:  $12-15\text{ m}^3/\text{t}$ ;
- Higiênico:  $12-15\text{ m}^3/\text{t}$ ;
- Escrever e imprimir:  $>20\text{ m}^3/\text{t}$ .

É importante ressaltar que o reuso de água no processo de fabricação e reciclagem do papel em indústrias europeias é maior que nas indústrias das Américas, portanto, o consumo de água na produção de papel de polpa crua e papel reciclado tende a ser maior no Brasil do que nos dados apresentados acima.

## **5.2 O efluente industrial do processo de reciclagem do papel**

De acordo com McKinney (1995), serão comumente encontrados no efluente proveniente da reciclagem de papel sólidos suspensos:

- Fibras finas e grossas;
- Halogênios;
- Minerais;
- Partículas de tinta;
- Substâncias orgânicas coloidais;
- Materiais orgânicos, etc.

De acordo com English (1994), o processo *deink* contribui efetivamente na produção de efluente resultando do processo de reciclagem do papel, Tabela 7:

Tabela 7 - Efluente industrial do processo *deink*

<b>Efluente do Processo <i>Deink</i> (valores típicos)</b>						
<b>Categoria de Papel</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>/t)</b>	<b>Sólidos Suspensos Totais (kg/t)</b>	<b>DBO (kg/t)</b>	<b>Sólidos Dissolvidos Totais (kg/t)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>Escrever e Imprimir</b>	26.7	53.3	21.3	146.6	8.0 - 8.5	38 - 43
<b>Lenço de Papel</b>	35.5	71.0	26.6	195.1	8.0 - 8.5	32 - 41
<b>Jornal</b>	30.0	44.9	12.0	104.9	7.5 - 8.0	32 - 43

Fonte – English (1994)

As fábricas europeias costumam realizar um maior reciclo de água no processo de fabricação e reciclagem do papel do que as fábricas americanas. A tabela 7 apresenta os valores típicos relacionados ao efluente industrial do processo deink de reciclagem do papel em indústrias canadenses. Podemos considerar que os valores brasileiros se aproximam mais dos valores do Canadá do que da Europa. Desta forma, percebe-se que, de fato, o consumo de água e o descarte de efluente do processo de remoção de tinta do papel não podem ser desconsiderados, deve ter um peso grande na comparação dos impactos ambientais da produção do papel de polpa virgem e reciclada.

Como se pode observar na tabela 7, as proporções destes constituintes do efluente podem variar de acordo com o tipo de papel a ser reciclado. O valor da demanda química de oxigênio por demanda bioquímica de oxigênio (DQO/DBO) pode variar entre 2 e 4,1, o que indica que este efluente é relativamente de fácil tratamento biológico, de acordo com McKinney (1995). Este autor também indica que o que difere consideravelmente o efluente na reciclagem de diferentes tipos de papéis reciclado é a concentração de sólidos suspensos, que pode variar até 50 quilogramas por tonelada (kg/ton) de efluente para a reciclagem de embalagens até 350 kg/ton resultante da produção de papel para escrever e imprimir.

Para a análise da sustentabilidade da reciclagem do papel é importante lembrar que para reciclar o papel, este já foi produzido, utilizando muitos recursos naturais e lançando diversos resíduos e efluentes. É considerado neste trabalho que a reciclagem do papel apenas soma aos valores de produção do papel de polpa virgem, pois, como apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho, a produção

de papel de polpa virgem tende a crescer a cada ano, bem como já vem acontecendo nas últimas décadas. Portanto, o valor referente ao volume de efluente gerado decorrente da reciclagem do papel irá somar ao volume de efluente gerado na produção de papel virgem, pois aumentar a produção de papel reciclado não significa que a produção de papel de polpa virgem irá diminuir. De acordo com Springer (1993), a produção de papel virgem irá gerar 51 m<sup>3</sup>/t de efluente.

Uma discussão acerca do efluente do processo *deink* é que tintas de caneta normalmente possuem metais pesados, o que poderia ser um fator a ser considerado como um empecilho para o tratamento deste efluente. Entretanto, de acordo com uma pesquisa realizada pela USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), mostra que a concentração de metal pesado no efluente industrial de reciclagem de papel se assemelha aos valores encontrados no efluente doméstico, apenas apresentando uma concentração um pouco maior de cobre. Contudo, a concentração de nutrientes no efluente industrial é baixa, como nitrogênio e fósforo que são essenciais para o desenvolvimento de bactérias no tratamento biológico, devendo, portanto, ser adicionado tais nutrientes durante o tratamento.

A fim de diminuir o volume de efluente industrial, é necessário diminuir também o volume de água no processo de produção e reciclagem do papel, desta forma, é muito utilizado um sistema de reuso de águas no processo. Todavia, o sistema de reuso de água dentro da fábrica de papel pode resultar em alguns problemas tanto para o processo quanto para a qualidade da folha de papel, tais quais:

- Aumento da corrosão nas tubulações;
- Aumento de depósitos nas tubulações, tanto por substâncias orgânicas quanto inorgânicas;
- Aumento da ação microbiana dentro do processo produtivo;
- Efeitos adversos nas máquinas químicas e no processo molhado de produção de papel;
- Aumento da temperatura da água no sistema.

Para diminuir esses possíveis problemas dentro da produção de papel que reusa a água no processo, algumas medidas devem ser tomadas, como o uso de tubulações inoxidáveis, sistema de resfriamento de água e agentes químicos que minimizam a deposição de substâncias nas tubulações, além do devido tratamento prévio que esta água a ser reusada deve sofrer, para atingir a qualidade necessária para o processo produtivo. Este tratamento é chamado de “clarificação” (MCKINNEY, 1995, tradução nossa).

### **5.3 Recursos energéticos e Emissões Atmosféricas na Reciclagem do Papel**

Bem como a grande maioria dos aspectos ambientais, a reciclagem do papel possui impactos positivos e negativos para o meio ambiente. Para saber se a reciclagem é vantajosa ou não do ponto de vista ambiental, deve-se analisar e ponderar os impactos positivos e negativos, levando em consideração os possíveis impactos desde a coleta do papel até os processos industriais de reciclagem e seus resíduos.

De acordo com McKinney (1995), um fator que deve ser considerado para a comparação entre a produção de papel de polpa virgem e de papel reciclado é que o segundo emite mais gases do efeito estufa que o primeiro, devido o maior consumo de combustíveis fósseis, que libera gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). A produção de papel virgem só consome combustível fóssil no transporte da coleta até o pátio de madeira dentro da fábrica. Ainda segundo McKinney (1995), se for considerado a emissão de gases do efeito estufa como sendo o fator determinante na comparação dos dois tipos produtivos, a produção de papel de polpa virgem combinado com a incineração do papel pós-uso seria, provavelmente, a melhor escolha do ponto de vista ambiental.

McKinney (1995) faz algumas sugestões para diminuir o impacto ambiental proveniente da emissão de gases estufa, tais como:

- Aumento da eficiência energética no processo produtivo;
- Uso de energia renovável;



- Queima do lodo primário da estação de tratamento de efluentes, que é rico em fibras, com a finalidade de produzir energia.
- Tratamento anaeróbio de efluentes, ao invés de tratamento aeróbio, quando possível. O tratamento anaeróbio libera gás metano, que pode ser utilizado como combustível.

Um estudo realizado no oeste da Europa sobre os impactos da reciclagem foi citado por McKinney (1995), que apresenta alguns dados relevantes para a comparação entre os impactos da produção de papel virgem e reciclado. Neste estudo foram determinados três casos teóricos, sendo eles:

1. Cenário de maior porcentagem de reciclagem, sendo 90% do papel pós-uso disponível, com uma média de 56% de uso de papel reciclado em toda a produção de papel e cartão;
2. Cenário com uma reciclagem mais seletiva, levando em consideração a distância que será percorrida da fonte de papel pós-uso até a indústria que reciclará o papel, apresentando 35% de uso de papel reciclado em toda a produção de papel;
3. Cenário onde a taxa de reciclagem é nula e todo o papel pós-uso é destinado à incineração.

Este estudo aponta que quando passa do cenário 2 para o 1, há uma diminuição de 9% no consumo de madeira para a extração da celulose. Entretanto, o estudo defende que esse consumo menor de madeira não seria efetivo, pois aumentaria o desperdício de recursos madeireiros, porque resultará na não utilização de aparas resíduos da madeira. Tendo em vista que a indústria de celulose e papel investe consideravelmente em recursos florestais, a diminuição deste investimento poderá resultar no aumento do preço da madeira, influenciando no preço de outros produtos, como móveis e construção de casas (MCKINNEY, 1995).

Outro dado desta pesquisa de grande importância para a realização deste trabalho é relativo a recursos energéticos. O processo de reciclagem de papel aumenta o consumo de recursos energéticos não renováveis, como combustíveis fósseis. Esta pesquisa apresentada por McKinney (1995) aponta um aumento de 7% no consumo de tais combustíveis quando se passa do cenário 2 para o cenário 1, ou seja, a

reciclagem do papel aumenta consideravelmente a demanda por recursos energéticos que são, por muitas vezes, não renováveis e geram resíduos poluentes, resultando em impactos negativos sobre o meio ambiente.

Outro problema associado à queima de combustíveis fósseis é um aumento da emissão de gases compostos por enxofre e nitrogênio, que resultam em um impacto negativo para o meio ambiente, conhecido como “acidificação” (MCKINNEY, 1995, tradução nossa).

Este mesmo autor indica algumas atitudes durante o processo de reciclagem do papel que podem minimizar os problemas relacionados à acidificação, tais como:

- Organizar uma coleta de papel eficiente, evitando o consumo desnecessário de combustíveis dos caminhões de coleta;
- Priorizar o uso de trem como meio de transporte, ao invés de caminhões;
- Construção de fábricas de reciclagem de papel próximo aos grandes mercados consumidores;
- Converter os sistemas de queima de combustíveis fósseis para combustíveis renováveis, tais como o etanol, metanol e gás natural;
- Tratamento de emissões gasosas dentro da indústria, utilizando técnicas de desulfurização e desnitrificação;
- Uso de aparelhos e equipamentos com maior eficiência energética.

O autor também aponta que a coleta seletiva realizada “*door to door*” (em tradução livre, porta a porta, indicando o caminhão que é comumente utilizado na coleta seletiva em grandes centros no Brasil) é mais eficiente do ponto de vista energético do que o uso de bancos de coleta de papel pós-uso, pois este segundo tipo de coleta conta com a jornada individual de carro para levar o material até o posto de coleta.

McKinney (1955) cita que na reciclagem, os químicos utilizados no processo *deink* contribuem consideravelmente nas emissões gasosas, que são, de maneira geral, de mais difícil tratamento que os efluentes líquidos. Uma das contribuições deste processo é o aumento considerável da emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC, do inglês, volatile organic compounds). Devido à preocupação com os

possíveis impactos ambientais de tais poluentes gasosos, muitos acordos internacionais foram assinados por diferentes governos, a fim de controlar tais emissões (SO<sub>2</sub>, VOC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>).

#### **5.4 A reciclagem do papel e os resíduos sólidos**

O aumento das taxas de reciclagem de papel vem sendo muito bem aceito por governos do mundo todo, pois há uma preocupação mundial acerca da disposição correta de resíduos sólidos. É aceito por muitos governos e autoridades que a reciclagem do papel diminui consideravelmente o volume de resíduos sólidos a serem encaminhados para aterros sanitários, entretanto este dado não pode ser afirmado, pois o processo de reciclagem de papel também gera resíduo, tais como a geração de lodo da estação de efluentes, que se não forem reaproveitados como combustível para a geração de energia, este será disposto em aterros sanitários. McKinney (1995) afirma que em alguns casos, o volume de resíduo gerado no processo de reciclagem do papel é maior que o volume de papel utilizado para a reciclagem, dependendo da qualidade deste.

O autor indica também outros resíduos sólidos provenientes do processo de reciclagem do papel que requerem gestão e disposição adequadas, tais como:

- Embalagens de produtos químicos;
- Pallets;
- Papéis pós-uso que não possuem a qualidade adequada para a reciclagem;
- Excedentes químicos do processo;
- Sucatas metálicas;
- Resíduos de escritório;
- Restos de comida.

Entretanto, o autor cita que apesar de serem muitos itens, estes resíduos podem ter sua disposição adequada, podendo ser reutilizados e reciclados, ou seja, a maior preocupação com a gestão de resíduos sólidos de uma fábrica de reciclagem de

papel continua sendo a disposição/utilização adequada do lodo da estação de tratamento de efluentes.

### **5.5 Sumário de Impactos Ambientais da Reciclagem do Papel**

De maneira resumida, McKinney (1995) realiza um “sumário de impactos ambientais” do processo de reciclagem do papel, separando os itens da seguinte maneira:

- Impactos negativos:
  - ❖ Aumento do uso de combustíveis fósseis;
  - ❖ Aumento de emissões de SO<sub>2</sub> e de NO<sub>x</sub>;
  - ❖ Aumento da emissão de dióxido de carbono (gás estufa);
  - ❖ Aumento das emissões urbanas, decorrente do transporte da coleta de material pós-uso até as fábricas;
  - ❖ Diminuição de incentivo e investimento em cultivo de florestas, com consequente aumento do preço da madeira para outras finalidades.
- Impactos positivos:
  - ❖ Redução do volume de papel pós-uso em aterros sanitários;
- Impactos que podem apresentar aspectos positivos e negativos:
  - ❖ Em alguns aspectos, pode reduzir o gasto energético, enquanto em outros pode aumentar este gasto e ainda lançar para o meio ambiente poluentes, tais como os óxidos de nitrogênio e de enxofre;

### **5.6 A ecoeficiência do papel branco e do papel reciclado**

Em um estudo realizado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2012 foi feita uma comparação entre a ecoeficiência do papel branco e do papel reciclado através do conceito dado pelo World Business Council for Sustainable Development – WBCSD (1992), no qual ecoeficiência está diretamente relacionada ao uso mais eficiente de materiais e energia, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais e os custos econômicos.

Este estudo foi realizado através do estabelecimento de parâmetros a fim de realizar uma comparação entre dados obtidos em laboratório e dados estimados com ajuda de especialistas. Os parâmetros estipulados foram o consumo de água e de energia no processo produtivo. Foram testadas em laboratório amostras dos dois tipos de papel para determinar a quantidade de água na sua produção. Para o consumo de energia, esse estudo utilizou dados extraídos do site da BRACELPA. Foram considerados outros parâmetros secundários, tais como a demanda de oxigênio, emissão de gás carbônico e produção de madeira (desmatamento de florestas).

De acordo com Ribeiro et al. (2012), citando dados da BRACELPA, o consumo energético pode ser observado na Tabela 7:

Tabela 8 - Consumo de energia para a produção do papel em mil MJ por tonelada de papel

<b>Consumo de energia para a produção de papel</b>		
(em 1.000MJ/tonelada de papel)		
<b>Parâmetro</b>	<b>Papel Branco</b>	<b>Papel Reciclado</b>
<b>Produção do papel branco</b>	4	0
<b>Produção do papel reciclado</b>	0	3,5
<b>Celulose virgem</b>	4	4
<b>Produção de madeira</b>	1	1
<b>Extração de fibra longa</b>	0	7

Fonte - RIBEIRO et al. (2012)

Analisando a Tabela 8, Ribeiro et al. (2012) afirmam que a fabricação de papel reciclado utiliza 7.000MJ/t de papel a mais do que o papel branco.

Também foi fornecido o consumo de água para a produção do papel em mil litros por tonelada de produto (BRACELPA, 2012 apud RIBEIRO et al., 2012), como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Consumo de água para a produção de papel em mil litros por tonelada de papel

<b>Consumo de água para a produção de papel</b>		
(em 1.000L/tonelada de papel)		
<b>Parâmetro</b>	<b>Papel Branco</b>	<b>Papel Reciclado</b>
<b>Produção do papel branco</b>	8,5	0
<b>Produção do papel reciclado</b>	0	10
<b>Celulose virgem</b>	1	1
<b>Produção de madeira</b>	0,5	0,5
<b>Extração de fibra longa</b>	0	3,5

Fonte - RIBEIRO et al. (2012)

Esta tabela confirma o que já foi defendido anteriormente neste trabalho: O consumo de água no processo de reciclagem do papel é grande devido aos processos de purificação, *deink* e de separação e transporte de fibras. Nesta tabela apresentada por Ribeiro et al. (2012), é apresentado que a produção de papel reciclado consome 1500 litros a mais por tonelada de papel produzido.

Além dos aspectos energéticos e de consumo de água, Ribeiro et al. (2012) apresentam que, com relação à emissão e ao sequestro de CO<sub>2</sub>, a produção de papel branco apresenta um balanço positivo devido às plantações de pinus e eucalipto, tendo como resultado do balanço um sequestro de 5,95 toneladas de dióxido de carbono, enquanto a produção de papel reciclado apresenta um saldo negativo de 1,11 toneladas de emissão desta substância.

A seguir, um fluxograma resumido de entradas e saídas do processo de reciclagem do papel, a partir da coleta do material destinado à reciclagem até o rebobinamento, no qual o papel reciclado estará preparado para ser cortado, podendo retornar ao mercado consumidor.

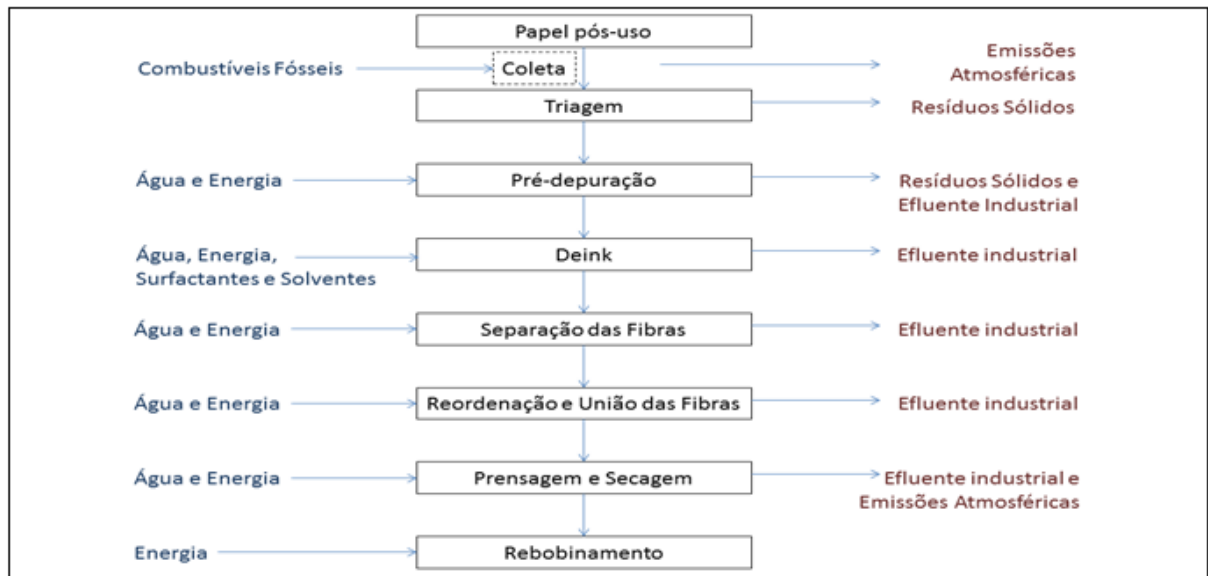


Figura 7 - Entradas e Saídas do processo de reciclagem do papel

## 6. CONCLUSÃO

Após a análise dos dados indicados no item Resultados e Discussões, observa-se que a produção de papel reciclado tem um impacto ambiental consideravelmente maior que a produção do papel de polpa virgem. No aspecto “consumo de água”, percebe-se que este consumo está relacionado com a pré-depuração do papel, com o processo *deink*, com a separação das fibras de celulose, sua reordenação e união e com a secagem da massa celulósica. Com este maior consumo de água, consequentemente haverá um maior volume de efluente industrial a ser tratado. Além de ser uma quantidade maior, este efluente conterá mais substâncias químicas que quando comparado com o efluente da produção de papel de polpa virgem. Isto se dá porque há um grande número de aditivos químicos no processo *deink*.

Ainda com relação ao consumo de água e geração de efluente industrial, encontra-se neste trabalho dados que mostram que a reciclagem do papel para escrever e imprimir, lenços de papel e jornal consomem mais água e geram mais efluente industrial do que a reciclagem de papel de menor qualidade, como embalagens, papelão, entre outros.

No aspecto “consumo de energia”, percebe-se de maneira clara quando observado a figura 8 que a energia é requerida em quase todas as etapas do processo de reciclagem do papel. Esta energia presente no processo pode ser tanto proveniente de combustíveis fósseis, como é o caso da coleta do papel pós-uso, como energia decorrente da queima da biomassa resultante do próprio processo produtivo, como citado anteriormente.

Independente da origem energética, esta irá resultar em emissões atmosféricas que podem ter um grande impacto ambiental, como se pode observar no processo de acidificação, que é resultado da emissão de substâncias tais como óxidos de nitrogênio e enxofre, resultantes da queima de combustíveis fósseis. A queima de biomassa e etanol, que são exemplos de combustíveis menos agressivos ao meio ambiente quando comparados aos combustíveis fósseis, liberam grande quantidade de dióxido de carbono. Desta forma, justifica-se a disparidade do balanço de sequestro/consumo de CO<sub>2</sub> quando é colocada em paralelo a produção de papel de polpa virgem e reciclado.



Outro dado relevante para este trabalho é a pesquisa citada por McKinney (1995), no qual foi provado que quando há um aumento de porcentagem de papel reciclado, há um consequente aumento de gasto energético: “Esta pesquisa aponta um aumento de 7% no consumo de tais combustíveis quando se passa do cenário 2 para o cenário 1, ou seja, a reciclagem do papel aumenta consideravelmente a demanda por recursos energéticos que são, por muitas vezes, não renováveis e geram resíduos poluentes, resultando em impactos negativos sobre o meio ambiente.”

Apesar de não ter um estudo específico comparando o volume e a classe do resíduo sólido gerado na produção de papel de polpa virgem e reciclado, parte-se do pressuposto de que a reciclagem do papel diminui consideravelmente o volume destinado aos aterros sanitários, bem como foi exposto por McKinney (1995). Entretanto, este mesmo autor defende que este dado não pode ser afirmado, porque o processo de reciclagem também gera resíduos sólidos em grande quantidade, bem como o lodo proveniente da estação de tratamento de efluente industrial.

Tendo em vista que a ABNT classifica o papel reciclado aquele papel que possui 50% de polpa virgem, 25% de aparas que não foram para o mercado consumidor e somente 25% do papel reciclado é de fato aquele proveniente do pós-uso do consumidor, considera-se que, no Brasil, para produzir o papel reciclado irá ser utilizado grande porcentagem de polpa virgem, ou seja, o aumento da produção de papel reciclado não é sinônimo de uma diminuição na produção de papel de polpa virgem. Através deste dado, considera-se que a reciclagem do papel gera uma demanda extra de água e energia, um lançamento de efluente e de emissões gasosas acima daquelas ocasionadas pela produção do papel branco.

Outro dado pressuposto pelo mercado consumidor é que, quanto maior a quantidade de papel reciclado, menor será a área desmatada pela colheita de pinus e eucalipto. Contudo, de acordo com McKinney (1995), a diminuição da demanda por florestas resulta em impactos negativos, pois as indústrias iriam investir menos em cultivos florestais, o que resultaria em um aumento do preço da madeira e um maior desperdício das aparas de madeira.

Através de levantamento de literatura específica sobre o assunto, este trabalho conclui que no cenário brasileiro, no qual há uma nítida vantagem da produção florestal, consequentemente de polpa virgem, não é ambientalmente mais sustentável a reciclagem do papel, principalmente de papel para escrever e imprimir. Ou seja, a produção do papel de polpa virgem é mais sustentável do ponto de vista ambiental, considerando o consumo de água, a produção de efluente industrial, a demanda energética, as emissões gasosas, os recursos florestais e a geração de resíduos sólidos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Disponível em:<<http://www.bracelpa.org.br>>. Acessos entre: 26 ago. 2013 e 11 out. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Disponível em:<<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=51548>>. Acesso em: 14 set. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Disponível em:<<http://www.abraflor.org.br>>. Acesso em: 9 set. 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS APARISTAS DE PAPEL. Disponível em:<<http://www.anap.org.br>>. Acesso em: 14 set. 2013.

CHEHEBE, J.R.B. **Análise do ciclo de vida de produtos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

CORAZZA, R. Gestão ambiental e mudanças da estrutura organizacional. **RAE-eletrônica**, v.2, n.2, jun./dez. 2003. Disponível em:<<http://www.rae.com.br/eletronica/index.cfm?FuseAction=Artigo&ID=1392&Secao=ORGANIZA&Volume=2&Numero=2&Ano=2003>>. Acesso em: 10 set. 2013.

EHRENFELD, J.R. **Industrial ecology and interdisciplinary: a new challenge for University Teaching And Research Programs**. Noruega: Norwegian University Of Science- and Technology, 2001.

ENGLISH, C.J. et al. **Water use reduction in the pulp and paper industry**. [S.l.:s.n.], 1994.

FLORES, M.P.; ARAUJO, L.E.B.; TYBUSCH, J.S. Sustentabilidade, globalização econômica e a ascensão do capitalismo verde. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v.8, p.786-798, 2013. Disponível em:<<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/revistadireito/article/view/8411/5099#.UoytWqITuUk>>. Acesso em: 19 set 2013.

GALLON, A. V. **O processo de fabricação do papel reciclado e as ações associadas aos custos ambientais em indústria de Santa Catarina**. Associação Brasileira de Custos. Volume III. Santa Catarina. 2008

HOGLIND, O. **Environmental technology in pulp and paper industries**. Sweden: Kvaerner Pulping AB. Markaryd, 1999.

MACEDO, A.R.P.; VALENÇA, A.C.V. **Papel e celulose**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 1997. p.87-104.

MCKINNEY, R.W.J. (Ed.). **Technology of paper recycling**. Berlin: Springer, 1995.

NILSSON, W.R. Services instead of products: experiences from energy markets - examples from Sweden. In: MEYER-KRAHMER, F. (Ed.). **Innovation and sustainable development: lessons for innovation policies**. Heidelberg: Physica-Verlag, 1998. p.115-141.

NOSSA, V.; CARVALHO, L.N.G. Uma Análise do conteúdo do disclosure ambiental de empresas do setor de papel e celulose em nível internacional. In: ENCONTRO ANUAL DA ANPAD, 27., Atibaia, 2003. **Anais...** [S.l.:s.n.], 2003.

PIOTTO, Z.C. **Eco-eficiência na Indústria de celulose e papel-estudo de caso**. 2003. 2v. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PIRES, A.R.; VALENÇA, A. **Reciclagem de papel**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial; Gerência Setorial de Papel e Celulose do BNDES, 1996.

PIRES, C.B.; SILVEIRA, F.C.S. A Evolução da evidenciação das informações ambientais de empresas do setor de celulose e papel: uma análise de conteúdo das notas explicativas e relatórios de administração. **ConTexto**, v.8, n.3, 2008. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ConTexto/article/view/11104/6591>>. Acesso em: 20 set. 2013.

RIBEIRO, D.P.S. et al. **A Ecoeficiência do papel branco versu o papel reciclado**. Campinas: Unicamp, 2012.

SPRINGER, A.M. **Industrial environmental control: pulp and paper industry**. Bel Air: Tappi PR, 1993.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Disponível em: < <http://www.wbcsd.org/home.aspx>>

WORLD COMMISSION OF ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common future**. [S.l.], 1987. (Report Brundtland).

VELÁZQUEZ, S.M.S.G. **A Cogeração de energia no segmento de papel e celulose**: contribuição à matriz energética do Brasil. 2000. 191p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.