



Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre canudos de papel e de polipropileno utilizando a abordagem do berço ao portão da fábrica

Francisco Claudio Coelho

**Projeto Final de Curso**

Orientador: Prof. Marcelo Mendes Viana

Dezembro de 2019

Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre canudos de papel e de polipropileno utilizando a abordagem do berço ao portão da fábrica

## **Francisco Claudio Coelho**

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro(a) Químico.

Aprovado por:

---

Carlos Alberto das Chagas Jr, D. Sc.

---

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D. Sc.

---

Bruno Didier Capron, D. Sc.

Orientado por:

---

Marcelo Mendes Viana, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Dezembro de 2019

Coelho, Francisco Claudio.

Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre canudos de papel e de polipropileno utilizando a abordagem do berço ao portão da fábrica. Francisco Claudio Coelho. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, 2019.

Orientador: Marcelo Mendes Viana.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Canudo de papel. 3. Canudo de polipropileno. 4. Potencial de Aquecimento Global. 5. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 6. Marcelo Mendes Viana, D. Sc. Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre canudos de papel e de polipropileno utilizando a abordagem do berço ao portão da fábrica. Francisco Claudio Coelho. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2019.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	VIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Produção de canudo de polipropileno .....	5
3.1.1. Produção do polipropileno .....	5
3.1.2. Preparação dos canudos a partir do PP .....	8
3.2. Produção de canudo de papel .....	9
3.2.1. Produção da celulose .....	9
3.2.2. Produção de papel.....	12
3.2.3. Preparação dos canudos a partir do papel.....	13
3.3. Avaliação do Ciclo de Vida .....	15
3.3.1. Conceitos.....	15
3.3.2. ACV e a série NBR ISO 14000 .....	17
3.3.3. Metodologia de ACV .....	17
3.3.3.1. Definição de Objetivo e Escopo.....	18
3.3.1.2. Análise de Inventário .....	19
3.3.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) .....	20
3.3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida.....	22
3.3.4. Uso da ACV em estudo comparativo de canudos .....	23
4. EXECUÇÃO DA ACV.....	23
4.1. Definição do objetivo.....	24
4.2. Definição do escopo .....	24
4.2.1. Definição da função e da unidade funcional.....	24
4.2.2. Definição das fronteiras .....	24
4.2.3. Definição dos sistemas de produto estudados .....	25
4.2.3.1. Descrição dos subsistemas considerados na produção de canudo de papel .....	29

4.2.3.2. Descrição dos subsistemas considerados na produção de canudo de PP .....	33
4.2.4. Tipos de impacto e metodologia de AICV .....	34
4.2.5. Limitações .....	35
4.3. Análise de inventário.....	35
4.3.1. Análise de Inventário para o canudo de papel .....	35
4.3.1.1. ICV do subsistema de produção florestal.....	36
4.3.1.2. ICV do subsistema de transporte.....	36
4.3.1.3. ICV do subsistema de extração e branqueamento .....	37
4.3.1.4. ICV do subsistema de recuperação química.....	38
4.3.1.5. ICV do subsistema de produção de papel e do canudo .....	39
4.3.1.6. ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de papel.....	39
4.3.2. Análise de Inventário para o canudo de PP .....	43
4.3.2.1. ICV para o subsistema de extração de petróleo e refino do petróleo .....	43
4.3.2.2. ICV para o subsistema de craqueamento da nafta .....	48
4.3.2.3. ICV para o subsistema de polimerização do propeno e produção do PP .....	48
4.3.2.4. ICV para o subsistema de extrusão do PP e produção do canudo.....	49
4.3.2.5. ICV consolidado para a produção de canudo de PP.....	50
4.4. Avaliação de impactos ambientais e interpretação.....	53
4.4.1. Potencial de aquecimento global .....	53
4.4.2. Potencial de acidificação .....	56
4.4.3. Consumo biológico de oxigênio .....	57
4.4.4. Consumo de Recursos Naturais .....	59
5. CONCLUSÕES .....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## RESUMO

A utilização e descarte do plástico têm aumentado muito com o passar dos anos, o que tem gerado inúmeros impactos ambientais. Em especial, os canudos de plástico, por sua vida útil curta e utilização em larga escala, têm sido alvo de preocupação da sociedade e dos governos, com muitas cidades pelo mundo criando leis que restrinjam seu uso. Nesse momento, alternativas como o canudo de papel parecem mais interessantes do ponto de vista ambiental. No entanto, observa-se que as discussões em torno dessa substituição baseiam-se majoritariamente nos impactos da destinação final dos produtos, desconsiderando aspectos relativos à sua produção. Frente a esse problema, este trabalho busca comparar os impactos ambientais gerados pela produção de canudos de plástico e canudos de papel, utilizando para isso a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Para isso, foram obtidos dados de diversos trabalhos publicados desde 2004, relativos às entradas e saídas de cada etapa do processo de fabricação de cada um dos produtos. Esses dados foram organizados em Inventários do Ciclo de Vida e seus impactos foram avaliados em relação às categorias de Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Consumo Biológico de Oxigênio e Consumo de Recursos Naturais. Os resultados mostram que a produção de canudos de plástico gera mais impactos que a de canudo de papel em relação ao Potencial de Aquecimento Global, mas se mostrou mais vantajosa na avaliação das outras categorias.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da polimerização do propeno em polipropileno. ....	5
Figura 2: Esquema simplificado das etapas de fabricação de produtos poliméricos. .	6
Figura 3: Diagrama simplificado do processo Spheripol. ....	7
Figura 4: Esquema do processo de produção de canudos de plástico. ....	9
Figura 5: Visão geral do processo Kraft de produção de celulose. ....	10
Figura 6: Máquina para produção de canudos de papel. ....	14
Figura 7: Fluxograma da produção de canudos de papel. ....	15
Figura 8: Exemplo de um sistema de produto para ACV. ....	16
Figura 9: Fases de uma ACV. ....	18
Figura 10: Elementos da AICV. ....	21
Figura 11: Fluxograma para o sistema de produto considerado para produção do canudo de papel. ....	27
Figura 12: Fluxograma para o sistema de produto considerado para produção do canudo de plástico ....	28
Figura 13: Balanço das emissões de CO <sub>2</sub> na produção do canudo de papel. ....	53
Figura 14: Balanço das emissões de CO <sub>2</sub> na produção do canudo de plástico. ....	53
Figura 15: PAG na produção do canudo de papel. ....	54
Figura 16: PAG na produção do canudo de PP. ....	54
Figura 17: Comparação do PAG entre todos os subsistemas. ....	55
Figura 18: PA na produção do canudo de papel. ....	56
Figura 19: PA na produção do canudo de PP. ....	56
Figura 20: Comparação de PA entre todos os subsistemas. ....	57
Figura 21: CBO para a produção de canudo de papel. ....	58
Figura 22: CBO para a produção de canudo de PP. ....	58
Figura 23: Comparação de CBO entre todos os subsistemas. ....	59
Figura 24: CRN (água) para produção do canudo de papel. ....	60
Figura 25: CRN (água) para produção do canudo de PP. ....	60
Figura 26: Comparação do CRN (água) para todos os subsistemas ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos gases estufa e seus devidos potenciais de aquecimento global (GWP) em kg equivalente de CO <sub>2</sub> .....	34
Tabela 2: ICV de dados brutos para produção florestal de 1000 kg de madeira.	36
Tabela 3: ICV de dados brutos para o transporte rodoviário de 1000 kg km ...	36
Tabela 4: ICV de dados brutos para extração e branqueamento da celulose..	37
Tabela 5: ICV de dados brutos para recuperação química. ....	38
Tabela 6: ICV de dados brutos para produção de papel e de 1000 kg de canudos de papel. ....	39
Tabela 7: ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de papel. .	41
Tabela 8: ICV de dados brutos para a extração de 1000 kg de petróleo cru. ..	43
Tabela 9: ICV de dados brutos para o refino de 1000 kg de petróleo cru. ....	44
Tabela 10: Fatores de alocação para os derivados do petróleo. ....	45
Tabela 11: ICV de dados consolidados para a extração e refino do petróleo visando obter 1000 kg de nafta. ....	46
Tabela 12: ICV de dados brutos para o craqueamento e produção de 1000 kg de propeno.....	48
Tabela 13: ICV de dados brutos para polimerização do propeno e produção de 1000 kg de PP. ....	48
Tabela 14: ICV de dados brutos para extrusão e produção de 1000 kg de canudos de PP. ....	49
Tabela 15: ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de PP. ...	51



# 1. INTRODUÇÃO

Os plásticos são materiais leves, resistentes e muito versáteis, podendo ser moldados em diversos formatos para atender a uma grande variedade de aplicações. Essa ampla diversidade de uso dos plásticos ocasionou um aumento constante de sua produção e utilização em todo o mundo, passando de 2 Mt em 1950 a 380 Mt em 2015 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2018).

Estima-se que, até o fim de 2015, foram gerados, no total, 6300 Mt de lixo plástico, dos quais 9% foram reciclados, 12% foram incinerados e 79% foram descartados em aterros sanitários, lixões ou no ambiente natural (GEYER; JAMBECK; LAW, 2018). O descarte incorreto de plástico na natureza é uma fonte de graves problemas ambientais e constitui uma das principais ameaças à vida marinha. Animais marinhos podem enrolar-se nos materiais descartados, podendo afogar-se, sofrer ferimentos e ficar impossibilitados de movimentar-se ou alimentar-se. Além disso, esses materiais podem ser confundidos com alimentos e ingeridos, bloqueando seu trato digestivo (LAIST, 1987).

Dentre os produtos fabricados de plástico com potencial dano ambiental, destacam-se os canudos, que têm vida útil curta, não são biodegradáveis e geram problemas à natureza, representando importante objeto de preocupação para os governos (LIA; VASCONCELOS, 2019). Seguindo essa tendência, em 2018, a cidade do Rio de Janeiro tornou-se a primeira cidade brasileira a proibir o uso de canudos plásticos e obrigar a substituição destes por canudos de papel, um material biodegradável, ao sancionar a Lei nº 6.384, de 4 de julho de 2018 (RIO DE JANEIRO, 2018a). Alguns meses depois, esta foi substituída pela Lei nº 6.458, de 8 de janeiro de 2019, com o seguinte texto:

Obriga restaurantes, bares, lanchonetes, barracas de praia, ambulantes e similares autorizados pela Prefeitura a usarem e fornecerem canudos fabricados exclusivamente com material biodegradável e/ou reciclável individual e hermeticamente embalados com material semelhante. (RIO DE JANEIRO, 2019).

A justificativa do projeto de lei que a gerou, Projeto de Lei nº 981/2018, baseia-se nos impactos da disposição final dos produtos: “Com a evolução da sociedade e com o crescimento demográfico, a cada dia que passa utiliza-se cada vez mais acessórios plásticos, causando danos de dimensões incalculáveis à natureza em virtude do descarte irregular.” (RIO DE JANEIRO, 2018b).

No entanto, os problemas relacionados ao uso indiscriminado dos plásticos não decorrem somente do descarte inadequado, pois ainda na cadeia produtiva ocorrem danos ao ambiente, já que a maioria dos plásticos são polímeros de derivados de combustíveis fósseis, como etileno e propileno, que são recursos não renováveis (GEYER; JAMBECK; LAW, 2018). Durante a cadeia produtiva, podem ser encontrados problemas, por exemplo, nas etapas de extração, transporte e refino do petróleo, que geram os petroquímicos básicos utilizados como insumos na produção de plásticos (O'ROURKE; CONNOLLY, 2003).

Dessa forma, faz-se necessário entender também os impactos gerados pelo processo de produção, tanto dos canudos de plástico, quanto dos de papel, a fim de conhecer melhor a influência da cadeia produtiva de ambos produtos sobre o meio ambiente. As discussões em torno dos problemas gerados pelos canudos, sacolas e outros objetos comuns de plástico ou papel são importantes, mas, antes de transformá-las em leis, é necessário ter uma visão geral dos impactos gerados ao longo do seu ciclo de vida, para ter certeza do melhor caminho a se tomar.

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com aqueles impactos. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

O Ciclo de Vida de um produto é dado como o conjunto dos estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto (conjunto de processos elementares e seus fluxos que desempenham determinada função), desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final (ABNT, 2009a).

Como ferramenta de auxílio na execução de uma ACV existem as normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009, as quais fornecem os princípios, estrutura, requisitos e orientações a serem seguidos. Apesar disso, a execução de uma ACV completa é trabalhosa e, conforme as dimensões do sistema analisado, pode se tornar gigantesca.

Diante desse desafio, o presente trabalho procura conhecer os impactos ambientais gerados pelos processos de produção dos canudos de PP e de papel, e compará-los utilizando a metodologia de ACV, que é capaz de, entre outros:

identificar, ao longo do ciclo de vida dos canudos, os pontos que necessitam de melhorias do ponto de vista ambiental; apoiar a tomada de decisões na indústria e nas organizações governamentais ou não governamentais; e selecionar indicadores de desempenho ambiental dos produtos.

## 2. OBJETIVOS

Objetivo principal: Comparar os aspectos ambientais (fluxos de entrada e saída) e impactos ambientais gerados na produção de canudos de PP e de papel por ACV.

Objetivos específicos:

- i. Estudar as etapas dos processos de produção dos canudos de papel e de PP adotando a abordagem *cradle to gate* (etapas do ciclo de vida da extração das matérias-primas até o portão da fábrica);
- ii. Obter os Inventários do Ciclo de Vida (ICV) para os aspectos ambientais gerados na produção de 1000 kg de canudos de papel e PP;
- iii. Avaliar os Impactos Ambientais de cada tipo de canudo utilizando como categorias de impacto: Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Consumo Biológico de Oxigênio e Consumo de Recursos Naturais;
- iv. Comparar os resultados obtidos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Produção de canudo de polipropileno

Os canudos de plástico são utilizados em grande escala para consumo de bebidas. Lia e Vasconcelos (2018) realizaram uma pesquisa em Campo Grande-MS, e chegaram à conclusão de que 97% dos estabelecimentos participantes ofereciam canudos plásticos a seus clientes. Este exemplo demonstra quão difundido é seu uso em bares, restaurantes e outros locais onde são vendidas bebidas.

Estes canudos podem ser produzidos a partir de diversos tipos de polímeros, porém, neste trabalho, será considerada a produção a partir de polipropileno, por ser um dos materiais mais comuns atualmente para este tipo de produto (VIEIRA; DUARTE, 2018).

##### 3.1.1. Produção do polipropileno

O polipropileno é o produto da polimerização do propileno (também chamado propeno), conforme a Figura 1.

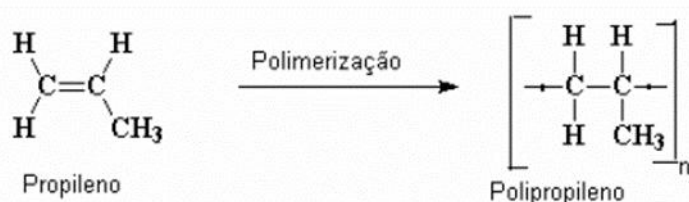


Figura 1: Esquema da polimerização do propeno em polipropileno.

Fonte: Carvalho (2008).

Através da reação de polimerização, as moléculas de propileno se unem, formando uma molécula maior de polipropileno. O propileno, por sua vez, é obtido de combustíveis fósseis, através de diversas rotas possíveis. A Figura 2 mostra um esquema resumido do processo completo.

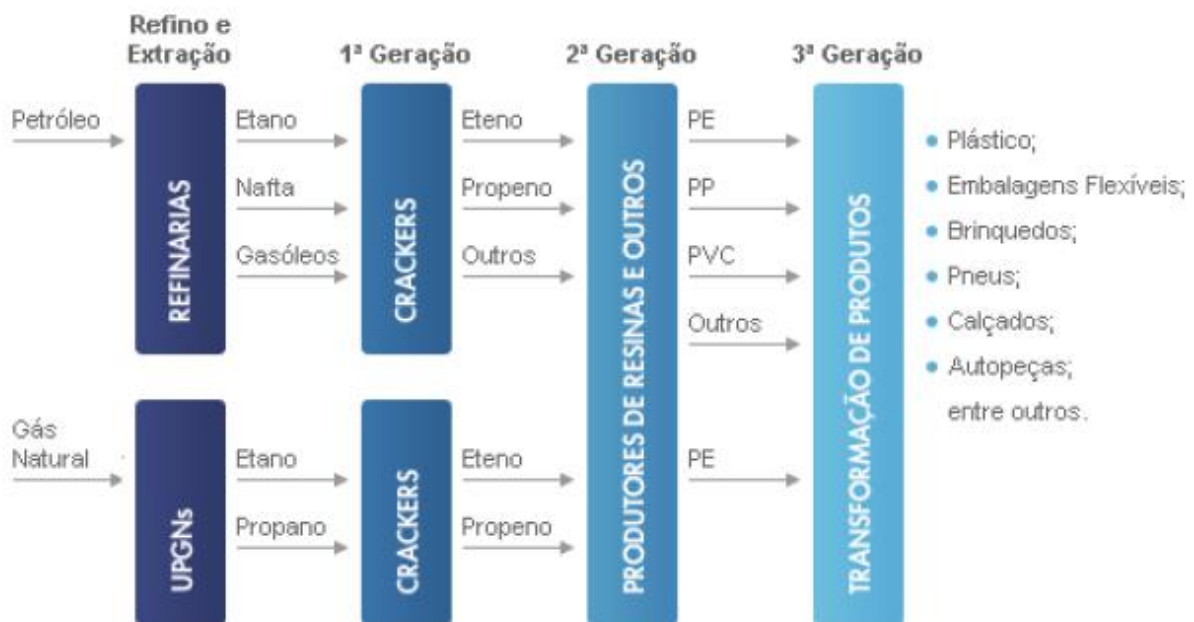


Figura 2: Esquema simplificado das etapas de fabricação de produtos poliméricos.

Fonte: Carvalho (2008).

Como mostra a Figura 2, são necessárias as seguintes etapas para fabricar um produto de plástico: extração, refino, craqueamento, polimerização e transformação. Cada etapa será explicada em detalhes a seguir.

O petróleo é extraído de reservatórios subterrâneos, bastante profundos. Neles, o óleo e o gás natural são encontrados em rochas porosas, a altas temperaturas e pressões. Quando o poço é perfurado, essa pressão é suficiente para que o petróleo suba à superfície (produção primária). No entanto, apenas 5-20% do óleo pode ser extraído dessa forma, pois, conforme o petróleo sai, a pressão diminui e torna-se necessário injetar um fluido para recuperar o restante (produção secundária). Injetando-se água, é possível extrair 40-50% do óleo original no reservatório. O restante continua no reservatório, pois a água encontra caminhos preferenciais dentro da rocha, e, além disso, a tensão superficial entre a água e o óleo não permite que todo o óleo seja deslocado pela água. Para extrair o óleo residual, é utilizada uma técnica chamada Recuperação Avançada de Petróleo, na qual outros fluidos, que buscam solucionar as dificuldades encontradas na produção secundária com água, são injetados no reservatório (BLUNT; FAYERS; ORR, 1993).

Na refinaria, são separados os componentes do petróleo, através de destilação fracionada, obtendo-se diversas frações, que ainda são misturas de compostos similares. Destes, a nafta, caracterizada por conter hidrocarbonetos saturados com

cadeia de mais de 5 átomos de carbono e ponto de ebulição até 150°C, é a mais utilizada para a fabricação de plásticos. A nafta é convertida, através de craqueamento, em hidrocarbonetos mais leves de cadeia insaturada, como o propeno (CARVALHO, 2008).

A polimerização do propeno pode ser realizada através de diversas técnicas, como: polimerização em solução, polimerização em suspensão, polimerização em massa ou polimerização em fase gasosa. Atualmente, uma das tecnologias mais usadas é a *Spheripol*, que utiliza polimerização em massa em meio líquido. A Figura 3 mostra um diagrama simplificado do processo.

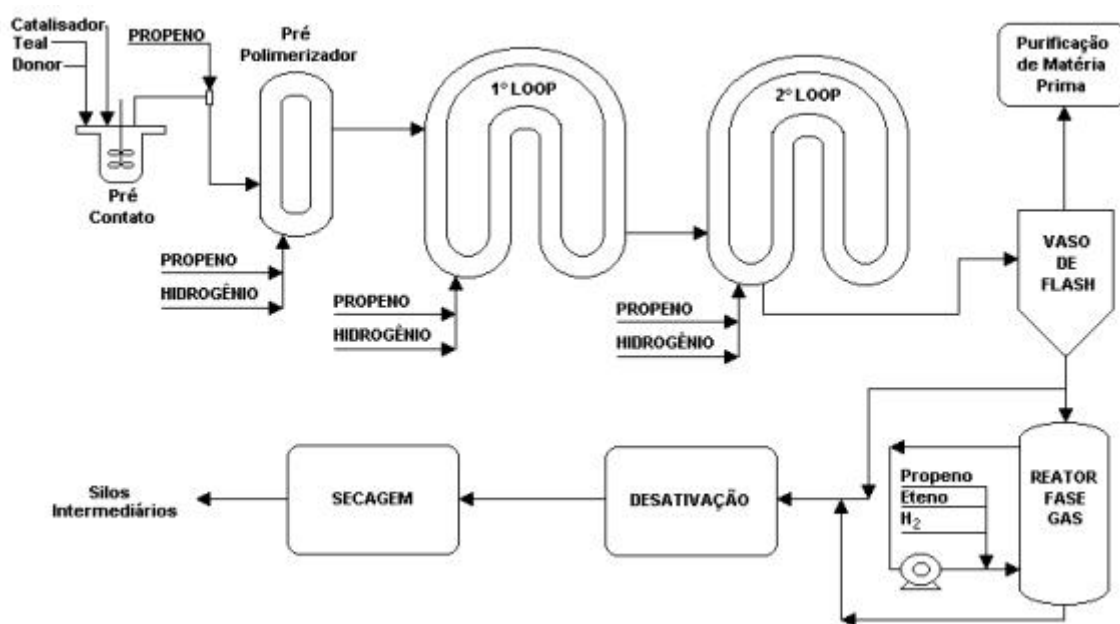


Figura 3: Diagrama simplificado do processo *Spheripol*.

Fonte: Petry (2011).

No início do processo, os componentes do sistema catalítico são misturados em um vaso de pré-contato, com posterior mistura deste sistema e do propeno em um pré-polimerizador, para sua ativação. A reação de polimerização ocorre em 2 reatores loop, cada um com uma alimentação de propeno, composta em parte de propeno fresco e em parte, propeno reciclado da etapa seguinte. Em cada fluxo de entrada de propeno, é adicionado também hidrogênio para controle do índice de fluidez.

A próxima etapa é um vaso de flash, onde a matéria-prima não reagida é separada e enviada para purificação para ser reciclada e retornar ao processo. Logo após, o produto pode passar por uma etapa opcional de copolimerização com eteno,

em fase gasosa. Uma vez realizadas as etapas de polimerização necessárias de acordo com a especificação do produto desejado, o fluxo é levado para o sistema de desativação e secagem.

Uma das vantagens do processo *Spheripol* é que o polímero é produzido em forma de esferas, apresentando melhor operabilidade que outras tecnologias em que as partículas produzidas são irregulares. Então, o produto pode ser armazenado nessa forma de esferas ou extrudado para formar pellets, que é sua forma mais comum de comercialização (PETRY, 2011).

Já estão sendo pesquisadas rotas para produção de polipropileno a partir de matérias-primas renováveis. A Braskem, única produtora de polipropileno no Brasil, já conseguiu produzi-lo a partir do etanol da cana-de-açúcar em escala piloto, o chamado PP verde. No entanto, ainda não há previsão da chegada desse produto no mercado, já que o processo carece de otimização e os custos ainda são considerados altos (PETRY, 2011).

### 3.1.2. Preparação dos canudos a partir do PP

O PP é comprado por indústrias de transformação, onde é gerado o produto final. O método de preparação dos canudos a partir do PP inclui:

- a) Extrusão do PP no formato de um longo tubo contínuo;
- b) Resfriamento do tubo a uma temperatura abaixo do ponto de amolecimento do polímero;
- c) Achatamento do tubo, diminuindo assim sua cavidade longitudinal central e reduzindo seu volume;
- d) Corte do tubo em dimensões adequadas;
- e) Dilatação dos canudos cortados para restaurar a área da seção transversal da cavidade longitudinal, reconstituindo sua estrutura tubular.

A Figura 4 apresenta um esquema do processo.



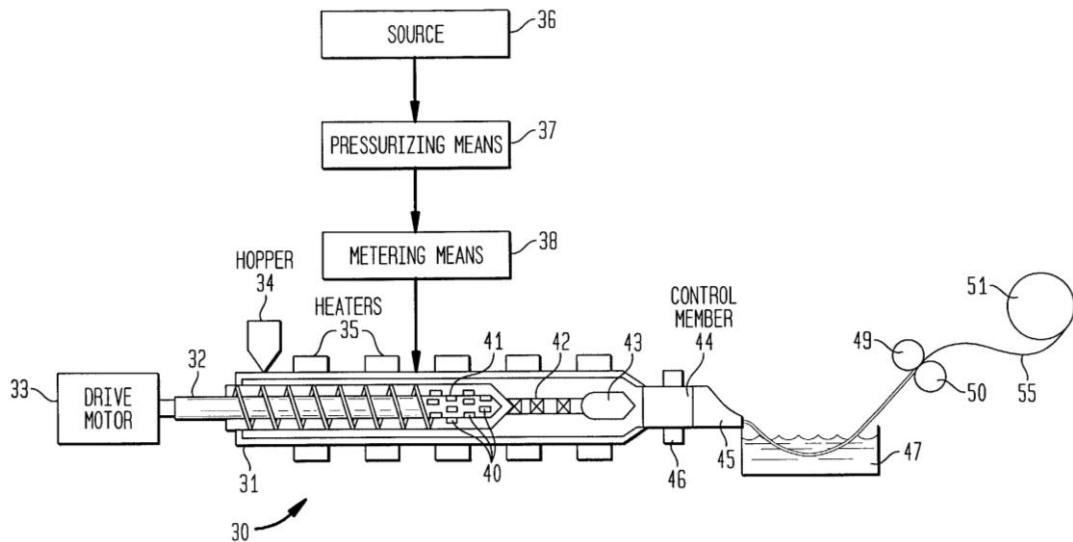


Figura 4: Esquema do processo de produção de canudos de plástico.

Fonte: Hollenberg (2002).

Na Figura 4, os números de 41 a 45 representam a extrusão mencionada em a); o número 47, o resfriamento da etapa b); os números 49 e 50 são os rolos responsáveis pelo achatamento do tubo em c); e o número 51 é um dispositivo que corta e dilata os tubos, representando as etapas d) e e). Os canudos produzidos são, então, vendidos para bares, restaurantes, supermercados, etc.

## 3.2. Produção de canudo de papel

### 3.2.1. Produção da celulose

A matéria-prima mais importante na produção do papel é a celulose, sendo necessário entender primeiro o processo de obtenção desta. A celulose é extraída principalmente da madeira, que pode vir de diversos vegetais, como pinho, araucária, abeto, eucalipto, álamo, carvalho, gmelina, entre outros.

Desses, o eucalipto e o pinho apresentam maior qualidade e produtividade e são plantados para este fim, uma vez que é inviável a produção a partir de florestas nativas. A fábrica de celulose pode plantar as próprias árvores ou comprar a madeira de terceiros (PIOTTO, 2003).

A extração de celulose da madeira pode se dar através de diversos processos: processo mecânico, processo termomecânico, processo semiquímico ou processos



colaterais que geram utilidades e cuidam dos resíduos gerados pelo fluxo principal. A seguir, serão descritas as etapas principais do processo.

A etapa inicial da preparação da madeira inclui: estocagem, descascamento, picagem e peneiramento. O descascamento é feito em tambor descascador e remove as cascas da madeira, que são encaminhadas para a caldeira de biomassa, que gera vapor e energia elétrica para alimentar o processo. As toras descascadas são encaminhadas ao picador para produção de cavacos uniformes, o que garante um cozimento homogêneo e aumenta o rendimento. O peneiramento tem como objetivo garantir que os cavacos produzidos estejam dentro de uma faixa adequada de tamanho. Os cavacos muito finos são enviados para a caldeira de biomassa, enquanto os muito grossos retornam ao picador (PIOTTO, 2003).

Após peneiradas, as fibras são cozidas em um digestor para dissolver a lignina e parte das hemiceluloses, separando-as. O licor de cozimento (licor branco) contém hidróxido e sulfeto de sódio como agentes químicos ativos. Cerca de 50% das fibras são dissolvidas nesta etapa (PIOTTO, 2003).

A polpa que sai do digestor contém fibras e licor negro, formado por lignina, hemiceluloses e outras substâncias solubilizadas durante o cozimento. Sendo assim, o objetivo da lavagem é separar as fibras do licor. O licor negro é enviado ao processo de recuperação, gerando energia e retornando como licor branco ao cozimento, enquanto as fibras passam por depuradores (peneiras centrífugas) para separar o material não processado e retorná-lo ao cozimento. Ao final da depuração, as fibras passam para a etapa de deslignificação (PIOTTO, 2003).

A deslignificação química com oxigênio é feita em meio alcalino, sendo geralmente utilizado o licor branco oxidado como álcali. Como o oxigênio é pouco solúvel no licor, essa etapa é feita a alta pressão e temperatura, e sulfato de magnésio deve ser adicionado para manter as propriedades da fibra. Após a deslignificação, pode haver mais uma etapa de lavagem, utilizando prensas em contracorrente, para recuperar o filtrado (PIOTTO, 2003).

A próxima etapa é o branqueamento, necessária para obter uma polpa com alvura maior e mais estável. São utilizados agentes químicos oxidantes para remover a lignina residual das etapas anteriores. O branqueamento é normalmente feito em 4 ou 5 estágios e utiliza dióxido de cloro, ozônio, oxigênio e peróxido. Após a etapa de branqueamento, é feita a depuração da polpa, da mesma forma que na etapa de

lavagem. Em fábricas integradas, a polpa vai daqui direto para a fabricação de papel. Em fábricas não integradas, ela é prensada, seca com vapor, cortada e embalada em fardos para ser transportada (PIOTTO, 2003).

O sistema de recuperação química tem 3 funções: recuperar os compostos inorgânicos utilizados no cozimento; recuperar subprodutos orgânicos com valor comercial; e gerar energia térmica e elétrica a partir da queima dos compostos orgânicos que não possuem valor comercial significativo. A energia gerada neste sistema é, geralmente, suficiente para alimentar a planta de produção de celulose (PIOTTO, 2003).

### 3.2.2. Produção de papel

A primeira parte da produção de papel a partir da celulose é a preparação da massa, que possui 4 etapas: desagregação da celulose, refinação, preparação da receita e depuração. Na primeira etapa de preparação da massa, a celulose é desagregada em um equipamento chamado desagregador, parecido com um liquidificador doméstico, mas com capacidade para 500 a 20.000 L. Esta etapa não é necessária quando a fábrica de celulose é integrada à de papel, pois a celulose já chega em suspensão.

A seguir, é necessário refinar a celulose, através de corte, esmagamento ou fibrilação. Esta etapa aumenta a superfície de contato da celulose com a água, permitindo maior retenção de água. O grau de refinação a ser atingido depende das características do papel desejado. Após refinada, a celulose passa para um tanque de mistura para a etapa de preparação da receita, onde são adicionadas outras matérias-primas que compõem o papel, como: cargas, agentes de colagem, amido e corantes. A última etapa consiste em depurar a mistura, para retirar corpos estranhos, sujeiras, bolos de massa ou fibras enroladas, que prejudicam a qualidade final do papel produzido. Após a depuração, a mistura vai para a máquina de papel (PIOTTO, 2003).

A máquina de papel pode ser dividida em 5 partes: caixa de entrada; mesa plana; prensas; secador; calandra e enroladeira. A caixa de entrada é um compartimento cuja função é distribuir a suspensão de fibras sobre a mesa plana o mais uniformemente possível. Em seu interior, existem cilindros rotativos perfurados, que uniformizam a suspensão, evitando a aglomeração de fibras em flocos, que

atrapalham a formação do papel. A mesa plana é onde ocorre a formação da folha de papel, sobre a tela formadora, possuindo um conjunto de rolos e elementos desaguadores. A mesa é feita de aço e a tela formadora é feita de plástico ou metal e tem a malha bastante fechada (80 mesh para papéis grossos e 100 mesh para papéis finos). Ao caírem sobre a tela, as fibras ficam retidas na superfície e a água passa através da mesma, escoando em calhas apropriadas.

Esta água, rica em partículas de fibras e cargas, é recirculada para diluir a massa que alimenta a máquina. Ao sair da mesa plana, a folha de papel já está formada, porém ainda está muito úmida, necessitando passar pelas prensas para retirar parte da água. Cada prensa é formada por 2 rolos cilíndricos, sendo o inferior de borracha ou ebonite e o superior de material mais duro, como granito, e são revestidos com feltro especial, onde fica retida a água.

Em geral, são utilizadas 2 ou 3 prensas, retirando cerca de 25% da água presente. O setor de secagem é o responsável por retirar o restante da água e realizar a cura das resinas adicionadas. Essa seção é composta de muitos cilindros secadores, com número dependendo do tipo e tamanho da máquina. O papel é seco por pressão de vapor e a água evaporada é extraída por coifas especiais. A umidade final da folha é de 3 a 8%. Finalmente, a calandra acerta a espessura e aspereza do papel, e, na enroladeira, a folha é bobinada até um diâmetro adequado (PIOTTO, 2003).

Como no caso dos canudos de plástico, a indústria de transformação é a responsável por produzir os canudos a partir do papel gerado pelo processo aqui descrito.

### 3.2.3. Preparação dos canudos a partir do papel

A preparação do canudo de papel em si é bastante simples, havendo diversas máquinas disponíveis no mercado que fazem todo o processo, recebendo as bobinas de papel e entregando os canudos prontos ao final, de forma automática.

No site de uma das empresas que vendem essas máquinas, Brásia Ltda, é possível encontrar as especificações técnicas de uma delas. A Figura 6 mostra uma foto dessa máquina:



Figura 6: Máquina para produção de canudos de papel.

Fonte: Brásia.

Além da foto, a empresa também disponibiliza um fluxograma que demonstra as etapas seguidas pela máquina para produzir os canudos, que pode ser visto na Figura 7.

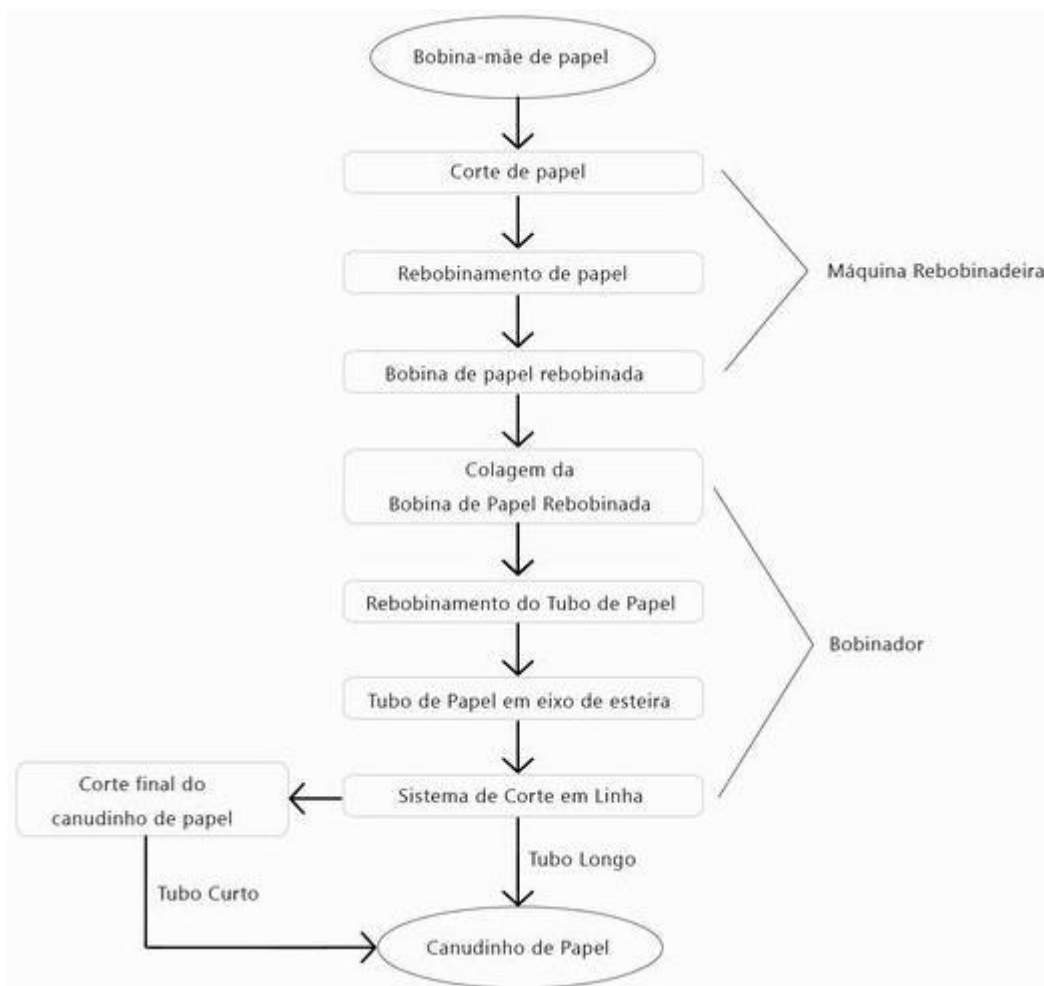


Figura 7: Fluxograma da produção de canudos de papel.

Fonte: Brásia (2019).

Pode-se perceber pelas Figuras 6 e 7 que a máquina consiste basicamente em um conjunto de rolos e bobinas que enrolam, cortam e colam o papel no formato de um longo tubo, que, ao final, é cortado no comprimento de um canudo. Ao saírem da máquina, os canudos estão prontos para comercialização e utilização.

### 3.3. Avaliação do Ciclo de Vida

#### 3.3.1. Conceitos

A ACV é um método de avaliação dos impactos ambientais de um produto ou serviço, ao longo de seu ciclo de vida. Assim, apresenta-se como importante ferramenta de prevenção de modificações do meio ambiente causadas pelas atividades humanas. Através dela, é possível identificar onde estão os principais

impactos ambientais do produto ou serviço analisado, auxiliando a tomada de medidas para redução desses impactos (VIANA, 2008).

Antes de estudar a metodologia da ACV, é necessário introduzir alguns outros conceitos, que são definidos na NBR ISO 14040:

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

A Figura 8 mostra um exemplo de sistema de produto, no qual se pode observar como se relacionam alguns dos conceitos aqui apresentados:

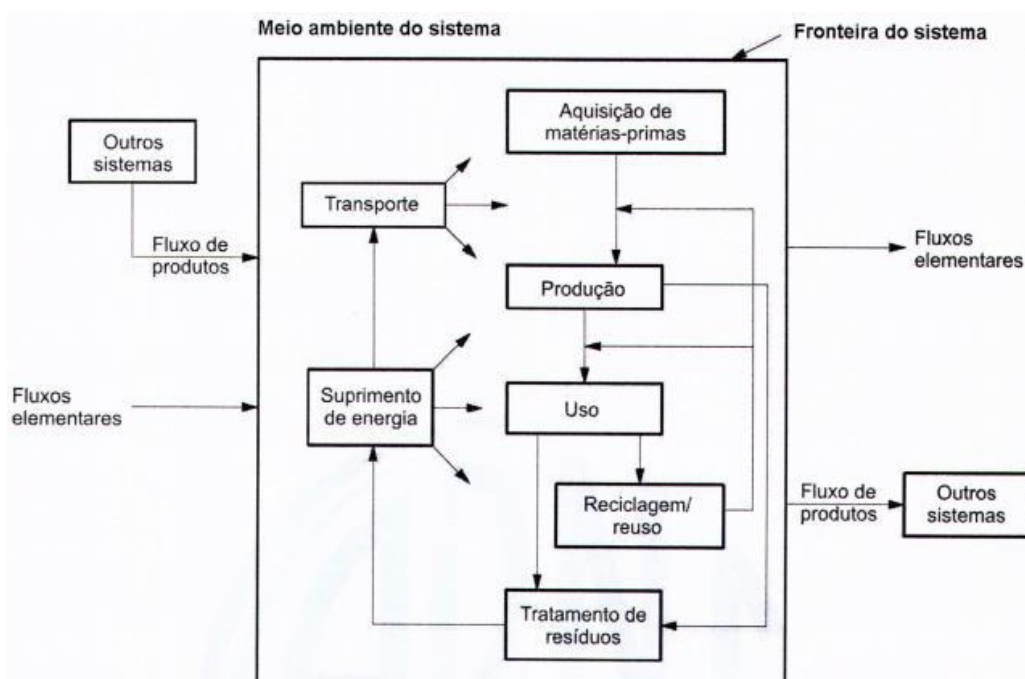


Figura 8: Exemplo de um sistema de produto para ACV.

Fonte: ABNT (2009a)



Na Figura 8, é possível ver a fronteira do sistema, que define que parte dele será analisada na ACV. Dentro da fronteira, temos diversos processos que trocam fluxos intermediários entre si. O sistema também troca fluxos de produtos com outros sistemas e fluxos elementares com o meio ambiente;

vii. Categoria de impacto: Aspecto ou conjunto de aspectos ambientais que representam uma questão ambiental relevante dos resultados da ACV.

Outro conceito importante é o de impacto ambiental, definido na Resolução CONAMA 1/86, de 23 de janeiro de 1986, como “... qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas...” (CONAMA, 1986), ou seja, em termos das definições apresentadas aqui, a uma alteração das propriedades do meio ambiente causada por um aspecto ambiental do sistema de produto analisado.

### 3.3.2. ACV e a série NBR ISO 14000

Os princípios e requisitos para a execução da ACV podem ser encontrados na família ISO 14.040, padronizada pela ISO. Atualmente, essa família é representada pelas seguintes normas:

- i. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura: esta norma apresenta a estrutura geral e os princípios a serem seguidos na execução de uma ACV;
- ii. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações: esta norma complementa a ISO 14040, contendo requisitos e orientações extras que devem ser levados em consideração durante o estudo de ACV.

Essas duas normas servem como um guia geral da metodologia de ACV e foram utilizadas como base para a metodologia desenvolvida neste trabalho.

### 3.3.3. Metodologia de ACV

Um estudo de ACV é composto de 4 fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A Figura 9 mostra um esquema das fases e suas inter-relações.

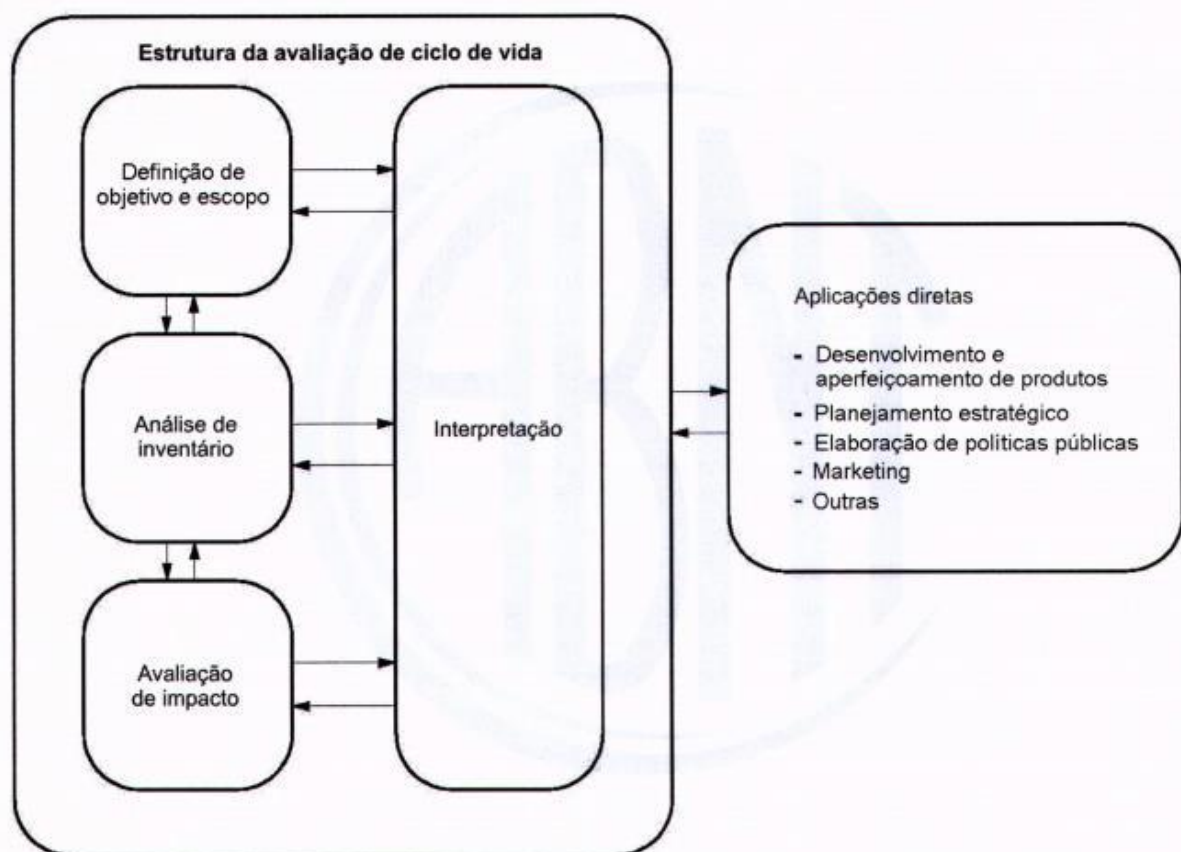


Figura 9: Fases de uma ACV.

Fonte: ABNT (2009a).

A Figura 9 mostra que as fases da ACV não seguem uma estrutura linear, mas os resultados de uma etapa podem afetar o que já foi definido em uma etapa anterior, sempre de forma a manter um conjunto coerente.

A seguir, serão detalhadas cada etapa e o que devem conter.

### 3.3.3.1. Definição de Objetivo e Escopo

O objetivo da ACV deve conter a aplicação pretendida, a motivação do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas posteriormente (ABNT, 2009a).

O escopo da ACV deve conter os seguintes itens:

- i. O sistema de produto e suas funções: O sistema de produto é o modelo que apresenta os elementos-chave do sistema físico estudado. Além do sistema de produto que será analisado, o escopo deve conter a(s) função (ões) que serão

consideradas para o sistema escolhido, já que um sistema pode ter várias funções possíveis;

- ii. A unidade funcional: uma referência quantitativa que relaciona as entradas e saídas do sistema, com base num fluxo de referência, para satisfazer a função determinada, ou seja, quanto produto é necessário para desempenhar essa função. Especialmente importante para garantir a comparabilidade de estudos de ACV de diferentes sistemas;
- iii. A fronteira do sistema: define quais fluxos e processos serão incluídos no sistema de produto. Ao estabelecer a fronteira, deve-se levar em consideração processos e fluxos, como: obtenção de matérias-primas, manufatura/processamento, distribuição/transporte, produção e uso de energia, uso e manutenção de produtos, disposição final de resíduos, recuperação de produtos, materiais auxiliares, equipamentos e operações adicionais, entre outros;
- iv. Procedimentos de alocação: como, muitas vezes, um processo não gera apenas uma saída, pode ser necessário realizar cálculos de alocação para repartir as contribuições dos aspectos ambientais de um processo entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas, para evitar dar mais peso a um processo do que ele realmente tem;
- v. Categorias de impacto, além de metodologia para sua avaliação e interpretação: aspectos importantes do sistema de produto, do ponto de vista dos impactos ambientais produzidos;
- vi. Limitações: outras informações importantes para a interpretação dos dados obtidos.

O escopo deve ser definido de forma a garantir que o objetivo declarado seja atingido. Para isso, pode ser necessário modificar algumas de suas características ao longo da execução do estudo (ABNT, 2009a).

#### 3.3.1.2. Análise de Inventário

Esta fase envolve coleta de dados e cálculos para quantificar as entradas e saídas relevantes do sistema de produto declarado no escopo da ACV. É um processo iterativo, pois, à medida que aumenta o conhecimento sobre o sistema, pode ser identificada necessidade de modificar o procedimento de coleta de dados, ou até

mudanças no escopo e objetivo do estudo, de modo a manter a compatibilidade entre as diferentes fases (ABNT, 2009a).

O primeiro passo para obtenção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a coleta de dados. Para cada processo dentro da fronteira do sistema, serão quantificados: entradas de energia, matéria-prima, auxiliares, entre outras; produtos, coprodutos e resíduos; emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos, entre outros. Como este processo pode ser muito custoso, devem ser consideradas no escopo restrições práticas de obtenção desses dados (ABNT, 2009a).

Após a coleta dos dados, será necessário realizar cálculos, como: validação dos dados; correlação dos dados ao fluxo de referência e à unidade funcional definidos no escopo; e alocação dos dados de acordo com os produtos gerados por cada processo. Ao final, será obtido um ICV consolidado, contendo os aspectos ambientais somados de todos os processos dentro da fronteira do sistema de produto analisado (ABNT, 2009a).

#### 3.3.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Esta fase tem como objetivo estudar a importância dos impactos ambientais potenciais do sistema estudado, de acordo com os resultados do ICV. Durante esta fase, será feita a associação dos dados de inventário a categorias de impacto específicas e seus indicadores, fornecendo também informações para a fase de interpretação do ciclo de vida.

Como as fases anteriores, esta também é iterativa, podendo exigir modificações no objetivo e escopo se houver indícios de que eles não serão alcançados (ABNT, 2009a). A Figura 10 mostra os elementos da AICV:

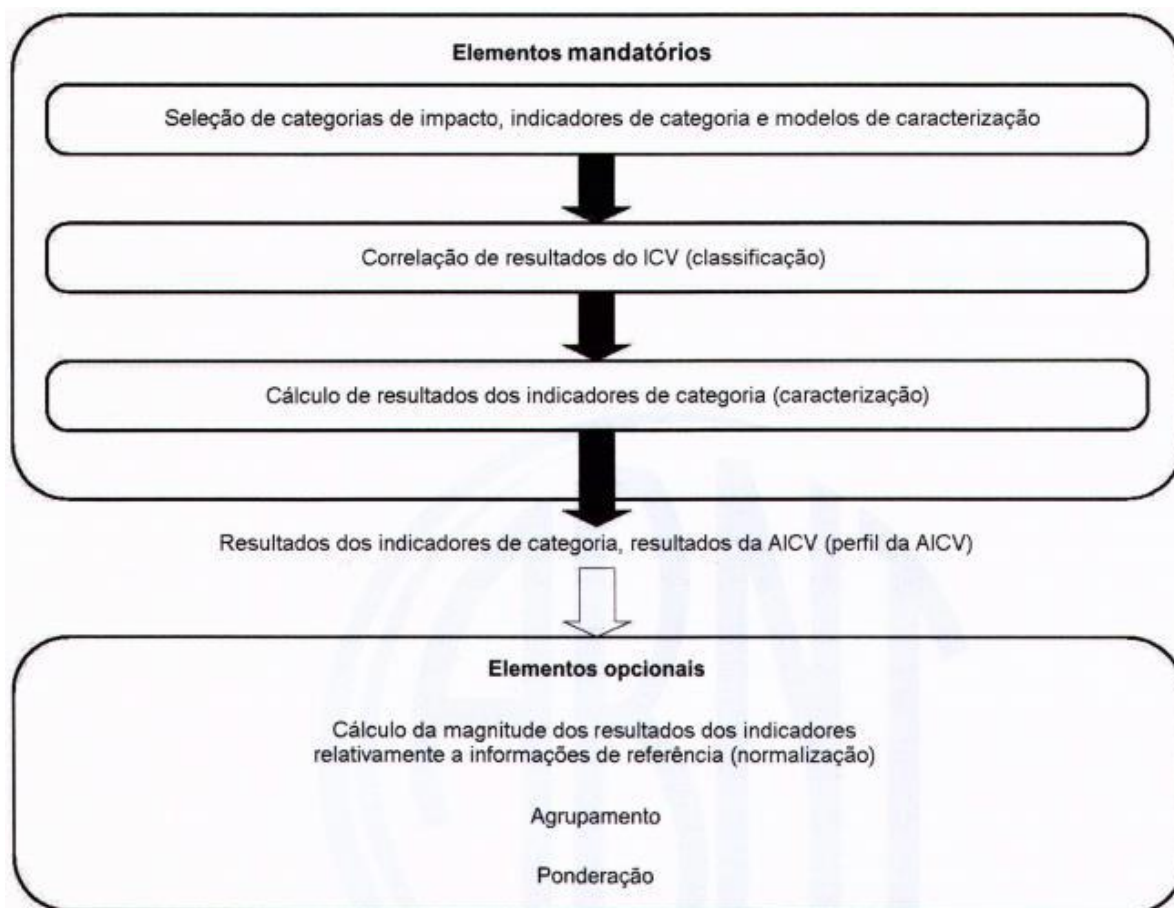


Figura 10: Elementos da AICV.

Fonte: ABNT (2009a).

Como pode ser visto na Figura 10, a AICV inclui a seleção das categorias de impacto a serem consideradas e seus indicadores, a correlação destas com os resultados do ICV e os cálculos dos valores de cada indicador. Além disso, ainda podem ser feitas comparações com resultados da literatura, agrupamentos, dentre outras análises.

É importante ter em mente que a AICV não engloba todos os impactos ambientais do sistema estudado, apenas aqueles definidos no escopo. Além disso, seus resultados ficam sujeitos às limitações encontradas na fase de análise de inventário (ABNT, 2009a).

Alguns exemplos de categorias de impacto que podem ser utilizadas nesta etapa são:

- i. Consumo de Recursos Naturais (CRN): quantificação de utilização de recursos naturais não renováveis nos processos incluídos na fronteira do sistema de produto analisado. A minimização do consumo desses recursos é uma ferramenta

- muito importante para a proteção do meio ambiente, já que o consumo excessivo ameaça a própria existência do ser humano (SZARGUT; ZIĘBIK; STANEK, 2002);
- ii. Potencial de aquecimento global (PAG): quantificação da emissão de gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFCs, HCFCs,  $\text{SF}_6$ , entre outros), responsáveis por refletir ou absorver a radiação infravermelha emitida pela Terra, impedindo que o calor saia para o espaço, o que aumenta a temperatura das camadas mais baixas da atmosfera. Dentre as consequências desse fenômeno, estão o derretimento das calotas polares, modificação do pH dos oceanos, aumento do nível do mar e mudanças climáticas regionais. Este potencial normalmente é calculado como kg equivalente de  $\text{CO}_2$ , com a massa emitida de cada gás sendo multiplicada por um fator e as contribuições individuais de cada gás somadas para obter um único valor de PAG para o processo ou sistema de produto. Os potenciais de aquecimento global de cada gás são calculados e divulgados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (STRANDDORF et al; 2005).
  - iii. Potencial de Acidificação (PA): quantificação da emissão de substâncias que causam liberação de prótons nos ecossistemas terrestres ou aquáticos. Os efeitos desse impacto incluem danos a florestas, construções, esculturas, à vida aquática em lagos, aos solos e produtividade agrícola. As principais substâncias responsáveis por esse impacto são os óxidos de enxofre (principalmente  $\text{SO}_2$ ) e óxidos de nitrogênio (principalmente  $\text{NO}_2$ ). O potencial de acidificação normalmente é expresso como kg equivalente de  $\text{SO}_2$ , calculado como:  
$$\text{PA} = \sum m_i \times f_i, \text{ e } f_i = \frac{n \times 32,03}{m_m}$$
onde n é o número de prótons liberados no ambiente por mol de substância i e  $m_m$  é a massa molar da substância i (STRANDDORF et al, 2005).
  - iv. Demanda Biológica de Oxigênio (DBO): é um parâmetro que quantifica a presença de matéria orgânica biodegradável com potencial para diminuir a concentração de oxigênio no meio aquático por reação biológica (SAMUDRO; MANGKOEDIHARDJO, 2010).

#### 3.3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida

Esta fase tem como objetivo fornecer uma apresentação compreensível, completa e consistente dos resultados da ACV, considerando em conjunto as fases de análise de inventário e avaliação de impactos. Os resultados devem estar de

acordo com o objetivo e escopo definidos e devem levar a conclusões, explicações e recomendações. Como todas as fases anteriores, pode incluir um processo iterativo de revisão do escopo e dos dados obtidos, sempre visando ao atingimento do objetivo (ABNT, 2009a).

Para uma correta interpretação dos resultados obtidos, deve-se seguir os seguintes passos: identificar as questões ambientais mais significativas, baseado no ICV e na AICV; realizar análises de completeza, sensibilidade e consistência; e produzir conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões identificadas como as mais relevantes para o meio ambiente (VIANA, 2008).

#### 3.3.4. Uso da ACV em estudo comparativo de canudos

Moran (2018) realizou um estudo de caso de um restaurante na cidade de Oberlin, nos Estados Unidos, contendo uma ACV modificada comparativa entre canudos de PP e de ácido polilático (PLA), um biopolímero. O autor coletou dados de CO<sub>2</sub> equivalente, desde a produção até a destinação final de ambos materiais, sempre considerando as particularidades desse restaurante em específico.

Ao final, chegou à conclusão de que havia menos emissões de gases de efeito estufa na produção de canudos de PLA do que na de canudos de PP, porém, para este restaurante em particular, haveria muito mais emissões no transporte dos canudos de PLA, já que nessa cidade existiam mais fornecedores de canudos de PP, e os fornecedores do material renovável se encontravam a uma longa distância do restaurante.

Sendo assim, o autor conclui que, considerando as emissões de gases de efeito estufa, não valeria a pena a troca de material de canudos pelo restaurante. No entanto, ele acredita que essa troca poderia ser feita mesmo assim, como estímulo a outros comércios a fazerem o mesmo, o que atrairia fornecedores de canudos de materiais renováveis, diminuindo as emissões relativas a esse material com o tempo. Dessa forma, a troca de material de canudos poderia ser usada como um investimento de longo prazo no meio ambiente.

## 4. EXECUÇÃO DA ACV

## **4.1. Definição do objetivo**

O objetivo da ACV é obter os Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) e executar a AICV para dois tipos de canudo: um de plástico, cujo material é o polipropileno (PP), e o outro de papel.

Este estudo foi conduzido utilizando os princípios e a estrutura metodológica definidos pela NBR ISO 14040 (2019a), e a NBR ISO 14044 (2009b) foi utilizada para consultar os requisitos e as orientações mais específicas.

## **4.2. Definição do escopo**

### **4.2.1. Definição da função e da unidade funcional**

Para a execução da ACV, definiu-se que a função para ambos os sistemas de produto é gerar canudos e, para fornecer uma quantificação do exercício da função, estabeleceu-se uma unidade funcional igual a 1000 kg de canudos, de papel ou PP.

### **4.2.2. Definição das fronteiras**

- Fronteiras em relação ao sistema natural: nessa ACV será adotada uma abordagem Cradle to Gate (berço ao portão da fábrica). Isso significa que as etapas do ciclo de vida do produto a serem consideradas são as de beneficiamento dos recursos naturais, fabricação dos produtos intermediários e fabricação do produto principal. As etapas de uso e disposição final são desconsideradas. Deste modo, para o caso do canudo de papel, temos: produção florestal da madeira, seguida de seu transporte até a unidade de produção de celulose, seu preparo, cozimento, produção da polpa celulósica, produção da polpa celulósica branqueada, produção do papel e, enfim, a produção do canudo de papel, não incluindo as etapas que envolvem a sua distribuição e uso. Para o caso do canudo de plástico, temos: extração do petróleo; refino do petróleo; craqueamento da nafta, produzindo o propeno; polimerização do propeno, produzindo o PP; e, finalmente, a produção dos canudos de plástico.
- Fronteiras geográficas: como esse trabalho visa à obtenção de dois ICVs que incluem fluxos de entrada de materiais, da qual parte é proveniente de



inúmeros países diferentes, não será especificada uma fronteira geográfica. Apesar disso, sempre que possível, serão levantados dados de tecnologias, processos produtivos e materiais, os quais refletem a realidade do Brasil. Uma exemplificação dessa situação é a consideração da produção florestal do eucalipto como fonte de celulose para a produção do papel, visto que, no Brasil, 75,2% da área plantada de madeira para fins comerciais é de eucalipto, o qual é fonte de celulose para 79% das unidades de fabricação de papel no Brasil (IBGE, 2017).

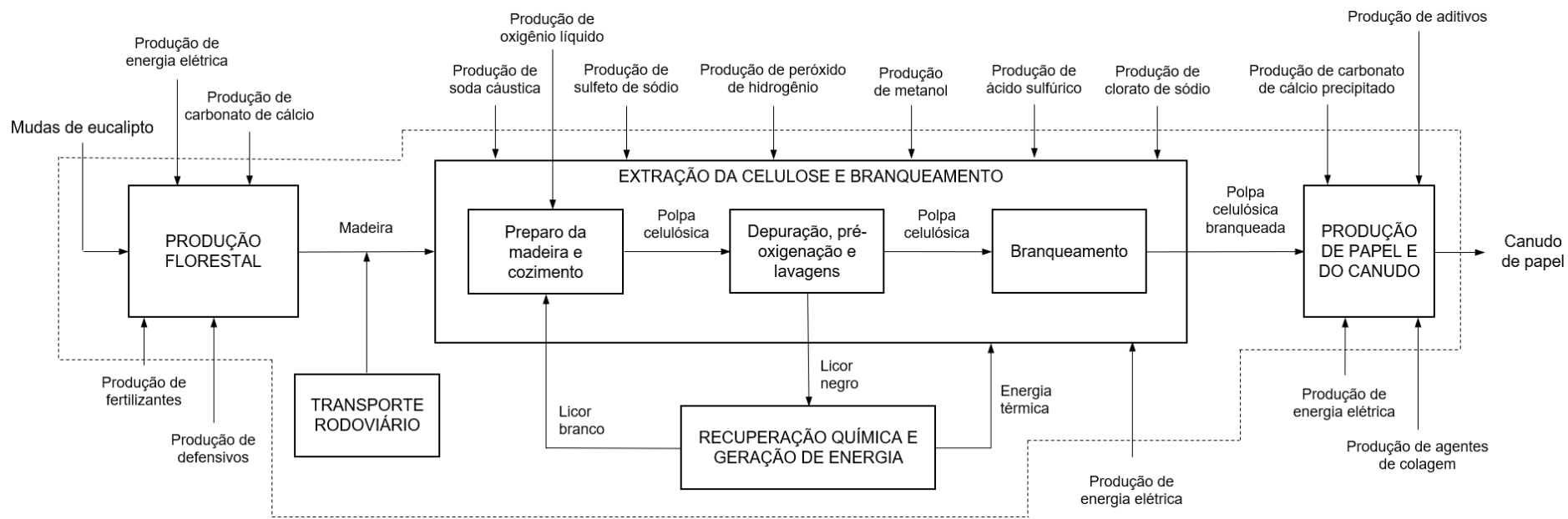
- Fronteiras temporais: Os dados coletados e adotados nesse trabalho assinalam ser de data a partir do ano de 2004;
- Fronteiras tecnológicas: definiu-se que as tecnologias adotadas no ciclo de vida do canudo de papel são: o processo Kraft para produção da polpa celulósica; o branqueamento livre de cloro elementar (ECF) para produção da polpa celulósica branqueada; e a produção, rebobinamento, colagem e corte do papel para produção do canudo. Para o caso do ciclo de vida do canudo de plástico, as tecnologias adotadas foram: extração do petróleo utilizando recuperação primária, secundária e avançada; o refino do petróleo cru, utilizando destilação atmosférica para obtenção da nafta; o craqueamento a vapor para obtenção do propeno; a polimerização *Spheripol* do propileno para produção do PP; e a extrusão térmica e corte do PP para produção do canudo.

#### 4.2.3. Definição dos sistemas de produto estudados

A partir das fronteiras estabelecidas foram elaborados os sistemas de produto para a produção dos canudos de papel e de PP, os quais são apresentados nas Figuras 11 e 12. Para facilitar a coleta de dados, a etapa mais trabalhosa e que demanda mais recursos dentro da análise de inventário, os dois sistemas de produto foram divididos em subsistemas do seguinte modo:

- Para o canudo de papel: subsistemas de produção florestal da madeira; transporte até a unidade de beneficiamento; extração e branqueamento da celulose; recuperação química e produção do papel e canudo;
- Para o canudo de plástico: subsistemas de extração e refino do petróleo; craqueamento da nafta; produção de PP; e produção do canudo por extrusão.

Logo após a apresentação dos dois sistemas de produto, serão feitas descrições de cada um dos subsistemas considerados.



----- Fronteiras em relação ao sistema natural

Figura 11: Fluxograma para o sistema de produto considerado para produção do canudo de papel.

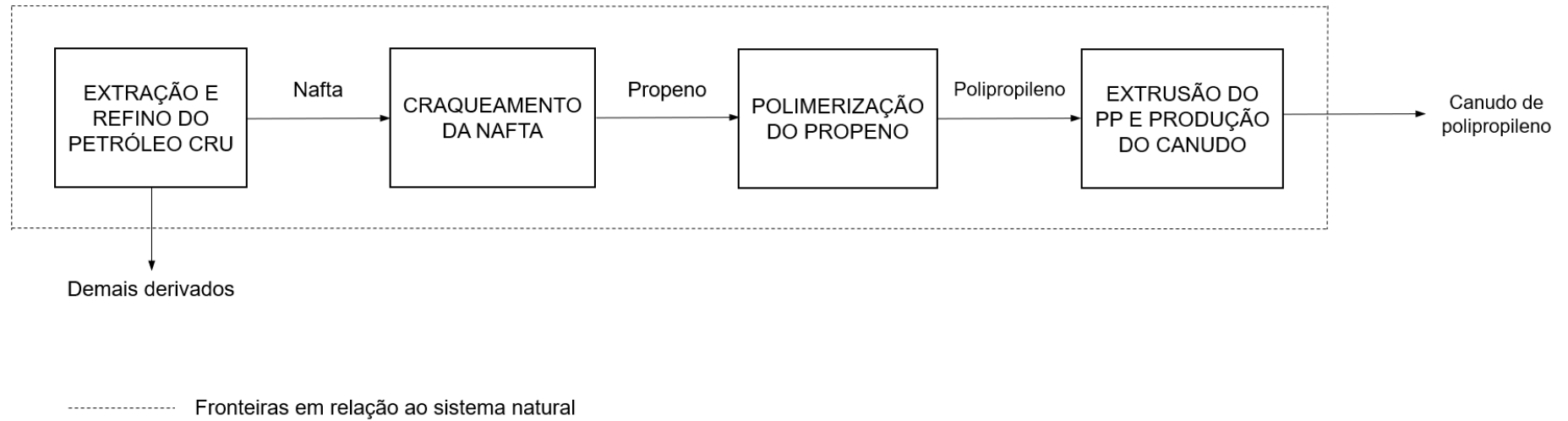


Figura 12: Fluxograma para o sistema de produto considerado para produção do canudo de plástico

#### 4.2.3.1. Descrição dos subsistemas considerados na produção de canudo de papel

- i. Subsistema da produção florestal da madeira: as principais etapas da produção florestal da madeira incluem as atividades de desenvolvimento de mudas de eucalipto no viveiro, o plantio e manejo para desenvolvimento da planta, seguida do corte. Em detalhes, a primeira atividade florestal consiste na implantação, que inclui o cultivo das mudas de eucalipto no viveiro, a fertilização do solo, o plantio dessas mudas no solo e o controle de pragas. A segunda fase é a de manejo florestal, que possui como objetivo a obtenção de madeira com a qualidade necessária para seu uso final, ou seja, a produção de canudos de papel. A terceira fase é a da colheita da madeira, que compreende as etapas de derrubada, de descascamento e do corte.

As entradas de fertilizantes, carbonato de cálcio e defensivos foram definidas nesse estudo como fluxos elementares, e no crescimento da floresta de eucalipto foi levado em consideração o consumo de dióxido de carbono na fotossíntese, valor que será identificado com valor negativo no inventário, visto que foi retirado da atmosfera;

- ii. Subsistema de transporte até a unidade de beneficiamento da celulose: para elaboração desse modelo foram obtidas na literatura as distâncias médias percorridas da área florestal até a unidade de beneficiamento da madeira para produção da polpa celulósica branqueada.

Será considerada a logística de transporte existente no grupo Suzano-Fibria, a maior empresa do mundo na produção de celulose de eucalipto, com capacidade de produção de 11 milhões de toneladas de celulose por ano e 1,4 milhão de toneladas de papel por ano em 11 fábricas no Brasil (FIBRIA, 2017). O grupo Suzano-Fibria é a empresa resultante de uma megafusão que ocorreu em janeiro de 2019, entre a Suzano Papel e Celulose com a Fibria (a Fibria é uma empresa que nasceu da fusão entre a Aracruz Celulose e a Votorantim em 2009).

- iii. Subsistema de extração e branqueamento da celulose: esse modelo envolve as atividades voltadas ao fornecimento de polpa celulósica branqueada à fábrica de produção de canudo. Como etapas temos o processo Kraft de polpação química

da madeira (preparo e seu cozimento ou digestão), a depuração, as lavagens, a pré-oxigenação da polpa celulósica e o seu branqueamento do tipo *Elementar Chlorine Free* (ECF).

No processo Kraft, a madeira é submetida a um processo polpação alcalina, o qual visa romper as ligações da estrutura lignocelulósica da madeira, isolando as fibras celulósicas. Assim sendo, a madeira é cozida em um digestor junto com uma solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, podendo-se existir ainda carbonato de sódio e pequenas quantidades de sulfato e sulfito de sódio, sendo possível remover grande parte da lignina presente na madeira, gerando uma polpa celulósica. Durante o cozimento ou digestão é realizada a introdução de vapor aquecido durante duas a quatro horas, na pressão de 7,0 a 7,7 kg/cm<sup>2</sup> e na temperatura de aproximadamente 170°C (CETESB, 1990).

Na etapa de depuração da polpa celulósica é feita a separação de nós de palitos existentes, para depois proceder à primeira lavagem alcalina. Geralmente essa lavagem é realizada em seis filtros sequenciais. Após o terceiro filtro, realiza-se uma dosagem de soda cáustica para acerto do pH e, em seguida, a massa é aquecida numa rosca com vapor direto e oxidada com oxigênio no estágio conhecido como pré-oxigenação (GALDIANO, 2006).

O processo de pré-oxigenação funciona como uma etapa inicial de branqueamento, visto que ele irá degradar e dissolver fragmentos de lignina ainda presentes na polpa. Após a pré-oxigenação é feita uma segunda lavagem, a qual separa a polpa celulósica do licor negro (constituído de remanescentes do cozimento, lignina e outros sólidos extraídos da madeira) que é encaminhado para a recuperação química (GALDIANO, 2006).

A polpa celulósica resultante da digestão, após os processos de lavagem, apresenta uma coloração escura, sendo necessária a realização de uma etapa de branqueamento para atingir o nível de alvura aceitável para sua aplicação em canudo de papel. No processo de branqueamento ECF são utilizados reagentes químicos como o dióxido de cloro, a soda caustica, oxigênio e peróxido de hidrogênio, em uma série de etapas estabelecidas com o propósito de alcançar o grau de alvura desejado.

Como o dióxido de cloro é um produto químico altamente reativo, ele necessita ser produzido e utilizado no próprio local, processo dado pela reação do clorato de sódio com metanol e ácido sulfúrico.

- iv. Subsistema de recuperação química: envolve atividades que têm como objetivo retornar reagentes à etapa de cozimento, como a recuperação do licor negro, por exemplo, além da produção de vapor e eletricidade pela queima do licor negro, concentrando-o em sólidos. Nesse subsistema, o licor negro necessita ser concentrado até uma concentração de sólidos de 60%, sendo, então, queimado em caldeira de recuperação química, o que leva a geração de vapor e energia elétrica.

O aumento da concentração de sólidos no licor negro, inicialmente com 12-16% de sólidos, é realizado em evaporadores de múltiplo efeito, sendo empregadas 6 unidades de evaporação interligadas. Normalmente, a concentração final obtida nos evaporadores de múltiplo efeito é de 45 a 55% de sólidos totais. Em uma segunda fase, o licor negro passa por evaporadores de contato indireto, onde sua concentração aumenta para 70% a 80% de sólidos totais (CPRH e GTZ, 1998).

Os gases de combustão do licor negro deixam a fornalha a aproximadamente 980°C, e passam por dispositivos de troca de calor, produzindo vapor superaquecido para a geração de energia e vapor de processo (CETESB, 1990).

A massa fundida formada é composta, principalmente, de carbonato de sódio e sulfeto de sódio, contendo impurezas em pequenas quantidades. Esses fundidos fluem através de uma bica resfriada com água, sendo então dissolvidos em um tanque de dissolução munido de agitador, parcialmente cheio com licor fraco de lavagem da área de caustificação, a ser explicada a seguir.

O líquido resultante, o licor verde, tem coloração esverdeada devido à presença de pequenas quantidades de sais ferrosos. Em seguida, o licor verde é clarificado para remoção de lamas e borras em suspensão, sendo enviado para a caustificação, a etapa final do subsistema de recuperação química. Essa etapa envolve a adição de óxido de cálcio ao licor verde, para converter o carbonato de sódio existente em hidróxido de sódio, produzindo o licor branco.

O lodo gerado nos caustificadores é enviado ao clarificador do licor branco, para a separação do carbonato de cálcio precipitado (conhecido como lama ou lodo de

cal). O licor branco clarificado é bombeado para o tanque de armazenagem de licor branco, de onde passa para os digestores.

O clarificador do licor branco produz uma lama de cal com teor de sólidos entre 35% e 40%, que é bombeada ao lavador de lama de cal, visando recuperar todo o hidróxido de sódio do lodo de cal, antes de enviá-lo a um forno de calcinação (IPT e SENAI, 1988). A lama de cal lavada e com teor de sólidos entre 35% e 45% é concentrada em filtro a vácuo de tambor rotativo, até atingir um teor de sólidos entre 55% e 75%, sendo então utilizada na alimentação de um forno de cal, onde o carbonato de cálcio será convertido em óxido de cálcio. O óxido de cálcio (cal virgem) formado é apagado, fornecendo o hidróxido de cálcio usado em seguida na caustificação do licor verde.

- v. Subsistema de produção do papel e do canudo: as principais etapas incluem a preparação da massa de celulose branqueada, a formação da folha, a secagem e a extrusão das folhas para formação dos canudos utilizando agentes de colagem ou adesivos.

As unidades produtoras de papel no Brasil costumam ser integradas com as de produção de celulose. Assim sendo, a celulose chega ao sistema de preparação da massa na forma de uma suspensão em água, com consistência de 3 a 12%. O primeiro passo consiste em formar uma suspensão de fibras em água, com consistência adequada, e realizar a adição dos demais componentes fibrosos e não fibrosos (o carbonato de cálcio precipitado é um dos aditivos não fibrosos mais utilizados na fabricação do papel) (IPT e SENAI, 1982).

Antes de entrar na máquina de papel, a massa diluída passa por um depurador para eliminação de aglomerados de fibras, nós, areia, partículas metálicas, entre outros.

Na máquina de papel, a polpa diluída entra com umidade maior que 97%, sendo lançada na forma de jato fino sobre uma tela. A ação filtrante da tela, combinada com sistema de vácuo, extrai a maior parte da água da polpa celulósica, formando, então, a folha. Esta atravessa seções sucessivas de secagem que chegam até 120°C, controlando, assim, sua umidade.

As folhas dão entrada na máquina de canudo, a qual pode produzir canudos com até 3 camadas de diferentes tipos de papel, utilizando agente de colagem ou material adesivo. O processo é simples e consiste apenas do rebobinamento e



colagem do papel, seguida do corte na dimensão estabelecida para o comprimento do canudo.

#### 4.2.3.2. Descrição dos subsistemas considerados na produção de canudo de PP

- i. Subsistema de extração do petróleo: A extração do petróleo envolve a retirada do poço e a separação em óleo, gás natural e água. A retirada do petróleo do poço acontece em três fases: recuperação primária, na qual o petróleo é impulsionado pela própria pressão do reservatório; recuperação secundária, na qual a energia do reservatório já não é suficiente, e é necessário injetar água ou gás para impulsioná-lo; e recuperação terciária ou avançada, na qual a extração torna-se ainda mais difícil e utilizam-se outras técnicas, como adição de polímeros e surfactantes, ou aquecimento. Após extraído, o petróleo passa pela separação; o óleo e o gás são enviados às refinarias e Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN), enquanto a água pode ser descartada ou reinjetada no poço (MEILI; JUNGLUTH; ANNAHEIM, 2018);
- ii. Subsistema de refino do petróleo: O refino inclui uma etapa de preparação do óleo, na qual ele é preaquecido e retiram-se impurezas, e a destilação fracionada, a pressão atmosférica, na qual são separadas várias frações com faixas de temperatura de ebulição diferentes, incluindo a nafta. Cada uma dessas frações passa então por outros processos de tratamento antes de sair da refinaria (GUPTA; NANDAN; MANDAL, 2015);
- iii. Subsistema de craqueamento da nafta: este subsistema inclui as etapas de pré-aquecimento da nafta, forno de craqueamento a vapor e separação dos produtos formados, onde é obtido o propeno que passa para o subsistema seguinte (RIBEIRO, 2009).
- iv. Subsistema de polimerização do propeno: este subsistema produz polipropileno homopolímero através da polimerização do propeno, utilizando como catalisador  $TiCl_4$  suportado em cloreto de magnésio. O PP produzido recebe aditivos e é extrudado e granulado para a venda (FENDRICH, 2008).
- v. Subsistema de produção do canudo de plástico: inclui três etapas principais: extrusão do PP no formato de um longo tubo; resfriamento e achatamento do tubo; corte e reestabelecimento do formato do canudo (HOLLENBERG, 2004).

#### 4.2.4. Tipos de impacto e metodologia de AICV

Nesta ACV, serão utilizadas como categorias de impacto ambiental o Potencial de Aquecimento Global (PAG), o Potencial de Acidificação (PA), o Consumo Biológico de Oxigênio (CBO) e o Consumo de Recursos Naturais (CRN). Levando em consideração essas categorias, os respectivos modelos de caracterização utilizados serão:

- i. Potencial de aquecimento global ( $\text{kg equivalente CO}_2$ ) =  $\sum m_i \times f_i$ , sendo  $m_i$  a massa do gás estufa  $i$ , e seu fator de multiplicação,  $f_i$ , verificado pelo *Global Warming Potential (GWP)*, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Características dos gases estufa e seus devidos potenciais de aquecimento global (GWP) em kg equivalente de CO<sub>2</sub>

Espécie química	Concentração atmosférica			Tempo de vida atmosférico (anos)	GWP (kg equivalente de CO <sub>2</sub> )
	1750	1998	2019		
CO <sub>2</sub>	277 ppm	367 ppm	415 ppm	-	1
CH <sub>4</sub>	700 ppt	1745 ppt	1858 ppt	12	23
N <sub>2</sub> O	270 ppt	314 ppt	332 ppt	120	296
CF <sub>4</sub>	40 ppt	80 ppt	-	>50000	5700
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0	3 ppt	-	10000	11900
SF <sub>6</sub>	0	4,2 ppt	-	3200	22200
CFCI <sub>3</sub>	0	268 ppt	-	45	4600
CHF <sub>3</sub>	0	14 ppt	-	260	12000
CF <sub>3</sub> Br	0	2,5 ppt	-	65	6900

Fonte: Modificado de IPCC (2001).

- ii. Potencial de acidificação ( $\text{kg equivalente SO}_2$ ) =  $\sum m_i \times f_i$ , sendo  $m_i$  a massa do gás ácido e  $f_i = \frac{n \times 32,03}{m_m}$ , com  $n$  igual ao número de hidrogênios liberados em solução quando o gás ácido sofrer reações secundárias e se transformar em algum ácido, e  $m_m$  a massa molecular do gás (Ministério do Meio Ambiente Dinamarquês, 2005);
- iii. Consumo de biológico de oxigênio ( $\frac{\text{kg O}_2}{\text{L}}$ ) =  $\sum m_i$ , sendo  $m_i$  a massa de oxigênio a ser consumida em algum corpo aquático por decomposição biológica aeróbia de determinado efluente líquido;

- iv. Consumo de recursos naturais (kg) =  $\sum m_i$ , sendo  $m_i$  a massa de recurso natural  $i$  consumida;

Para fins de classificação, os aspectos ambientais como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs, halons e HCFCs são classificados na categoria de PAG; H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> na categoria de PA; a demanda biológica de oxigênio na CBO e a entrada de H<sub>2</sub>O na categoria de CRN. Após a classificação, os aspectos ambientais serão calculados segundo o modelo de cada categoria, fornecendo o resultado dos indicadores de cada categoria, os quais serão comparados.

#### 4.2.5. Limitações

Esse estudo de ACV baseou-se totalmente em dados secundários obtidos de trabalhos já publicados na literatura. Além disso, devido à ausência de tempo, inúmeras entradas mássicas foram consideradas como fluxos elementares (fluxo elementar, ou seja, aquele que não leva em consideração as cargas de aspectos ambientais anteriores, somente a entrada mássica no sistema de produto).

Assim sendo, os resultados explicitados irão servir como resultado preliminar, sendo necessária futura revisão prévia e adição das cargas ambientais para comparação mais justa entre os diferentes tipos de canudo.

### 4.3. Análise de inventário

Como foi visto no item 4.2.3, os dois sistemas de produto considerados nesse trabalho são divididos em vários subsistemas, para os quais foram coletados os dados. Esses dados serão apresentados nas formas de Inventários do Ciclo de Vida (ICVs) de dados brutos para cada subsistema e logo depois os ICVs de dados consolidados, com os respectivos procedimentos de cálculo indicados de acordo com a unidade funcional de 1000 kg de canudos.

Na elaboração do ICV de dados brutos, as entradas foram divididas em fluxos elementares e fluxos de outros subsistemas, já as saídas foram divididas em produtos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos.

#### 4.3.1. Análise de Inventário para o canudo de papel

#### 4.3.1.1. ICV do subsistema de produção florestal

Os procedimentos de coleta de dados para a produção florestal envolveram a obtenção de dados secundários de Galdiano (2006), uma dissertação de mestrado referente ao ICV do papel offset produzido no Brasil, onde são explicitados os aspectos ambientais referentes a produção da madeira de eucalipto nas fases de viveiro, plantio e corte.

A Tabela 2 apresenta o ICV de dados brutos para produção florestal de 1000 kg de madeira.

Tabela 2: ICV de dados brutos para produção florestal de 1000 kg de madeira.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Água	kg	2,74E+02
CaCO <sub>3</sub>	kg	1,94E+01
CO <sub>2</sub> fixado	kg	9,63E+02
Energia elétrica	kWh	1,91E-02
Fertilizantes (NPK)	kg	8,83E+00
Formicidas	kg	8,83E-02
Herbicidas	L	1,40E-01
Mudas	-	1,77E+01
<b>SAÍDAS</b>		
Produto		
Madeira	kg	1,00E+03
Emissões atmosféricas		
CO <sub>2</sub>	kg	1,73E+00
Resíduos sólidos		
Resíduos de processo	kg	7,58E-01

Fonte: Modificado de Galdiano (2006).

#### 4.3.1.2. ICV do subsistema de transporte

Após a produção da madeira o produto necessita ser transportado até unidade de extração de celulose. Para inventariar esta etapa, foram utilizados dados do Ecoinvent 3.3 (2014), referentes aos aspectos ambientais gerados no transporte rodoviário em caminhões de 16-32 toneladas, movidos a diesel com baixo teor de enxofre.

A Tabela 3 apresenta o ICV de dados brutos para o transporte rodoviário de 1000 kg km.

Tabela 3: ICV de dados brutos para o transporte rodoviário de 1000 kg km

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
-------------------	---------	------------

ENTRADAS		
Diesel	kg	3,75E-02
SAÍDAS		
Emissões atmosféricas		
CO <sub>2</sub>	kg	1,17E-01
CO	kg	1,87E-04
Material particulado	kg	3,60E-06
N <sub>2</sub> O	kg	6,76E-06
NO <sub>2</sub>	kg	3,31E-04
SO <sub>2</sub>	kg	5,76E-07

Fonte: Modificado de Ecoinvent 3.3 (2014).

#### 4.3.1.3. ICV do subsistema de extração e branqueamento

Na obtenção dos dados para a extração da celulose e seu branqueamento, foram utilizados dados de Galdiano (2006), o qual levou em consideração o processo Kraft com o preparo da madeira, o cozimento, a depuração, a pré-oxigenação, as lavagens e finalmente o branqueamento com a obtenção da polpa celulósica branqueada e do licor negro, o qual é utilizado no subsistema de recuperação química.

Também foram utilizados dados do trabalho de Sun, Wang e Shi (2018), o qual inventariou o processo de produção da polpa de celulose branqueada utilizando processo alcalino, assim como o Kraft. A Tabela 4 apresenta o ICV de dados brutos para a extração e branqueamento da celulose.

Tabela 4: ICV de dados brutos para extração e branqueamento da celulose.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
ENTRADAS		
Água	kg	2,84E+04
Energia elétrica	kWh	4,58E+02
Energia térmica	kWh	2,21E+03
Madeira	kg	3,99E+03
NaOH	kg	9,89E+00
Na <sub>2</sub> S	kg	5,93E+00
NaClO <sub>3</sub>	kg	1,71E+01
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg	1,31E+01
Oxigênio líquido	kg	1,47E+01
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	kg	7,76E+00
Metanol	kg	2,13E+00
SAÍDAS		
Produto		
Celulose branqueada	kg	1,00E+03
Emissões atmosféricas		
CH <sub>4</sub>	kg	1,41E+01
CO <sub>2</sub>	kg	1,51E+03

CO	kg	2,31E+02
VOCs	kg	1,59E+01
Material particulado	kg	3,90E-01
NO <sub>2</sub>	kg	2,99E+00
SO <sub>2</sub>	kg	3,59E+00
H <sub>2</sub> S	kg	4,80E-01
<b>Efluentes líquidos</b>		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	1,81E+01
Nitrogênio amoniacal	kg	3,50E-02
Sólidos totais	kg	4,24E+01
Sólidos suspensos	kg	5,65E+00
DBO	kg	7,61E+00
<b>Resíduos sólidos</b>		
Cascas	kg	1,29E+02
Nós e palitos	kg	5,29E+01
Resíduos de processo	kg	6,01E+00
Lodo	kg	1,32E+02

Fonte: Modificado de Galdiano (2006) e Sun, Wang e Shi (2018).

#### 4.3.1.4. ICV do subsistema de recuperação química

Os dados obtidos para a recuperação química foram Galdiano (2016) e ABTCP (2012). Os dados da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) apresentavam dados detalhados a respeito dos aspectos ambientais gerados numa caldeira de recuperação, em especial, da unidade da Suzano-Fibria de Jacareí/SP, totalmente dentro do escopo do trabalho.

A Tabela 5 apresenta o ICV de dados brutos para recuperação química do licor negro.

Tabela 5: ICV de dados brutos para recuperação química.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Energia elétrica	kWh	8,50E+01
Energia térmica	kWh	1,69E+03
Licor negro	m <sup>3</sup>	1,95E+01
<b>SAÍDAS</b>		
<b>Emissões atmosféricas</b>		
CO <sub>2</sub>	kg	3,95E+03
Material particulado	kg	6,95E-01
SO <sub>2</sub>	kg	6,68E-02
H <sub>2</sub> S	kg	2,36E+00
<b>Efluentes líquidos</b>		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	5,54E+00
Sólidos totais	kg	1,06E+01

Sólidos suspensos	kg	7,16E-01
DBO	kg	5,18E-01
Resíduos sólidos		
Resíduos de processo	kg	4,24E-02

Fonte: Modificado de Galdiano (2006) e ABTCP (2012).

#### 4.3.1.5. ICV do subsistema de produção de papel e do canudo

Os dados obtidos para esse subsistema foram de Galdiano (2006). A Tabela 6 apresenta o ICV de dados brutos para produção de papel e obtenção de 1000 kg de canudos.

Tabela 6: ICV de dados brutos para produção de papel e de 1000 kg de canudos de papel.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Água	kg	1,91E+04
Celulose branqueada	kg	8,23E+02
Energia elétrica	kWh	6,11E+02
Energia térmica	kWh	1,60E+03
CaCO <sub>3</sub> precipitado	kg	1,05E+02
Agente adesivo	kg	1,00E+00
Aditivos não especificados	kg	1,90E+01
<b>SAÍDAS</b>		
<b>Produto</b>		
Canudo de papel	kg	1,00E+03
<b>Efluentes líquidos</b>		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	1,92E+00
Sólidos totais	kg	6,13E+00
Sólidos suspensos	kg	3,91E+00
DBO	kg	1,01E+00
<b>Resíduos sólidos</b>		
Aparas de papel	kg	9,85E+01

Fonte: Modificado de Galdiano (2006)

#### 4.3.1.6. ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de papel

Como ICVs de dados brutos para produção florestal, transporte, extração e branqueamento, recuperação química, produção do papel e do canudo já foram obtidos, a obtenção do ICV consolidado para produção do canudo de papel foi dada pela conversão dos fluxos para a unidade funcional.

Deste modo, verificou-se que para produção de 1000 kg de canudos de papel são necessários 823,46 kg de celulose branqueada, a qual é proveniente da extração e branqueamento da celulose presente em 3282,80 kg de madeira, processo que irá

gerar 16 m<sup>3</sup> de licor negro, o qual deverá ser recuperado. O transporte da madeira será dado em caminhão a diesel, percorrendo 100 km que é distância média entre a produção florestal e a unidade industrial de extração de celulose.

A Tabela 7 apresenta o ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de papel.



Tabela 7: ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de papel.

Aspecto ambiental	Unidade	Produção florestal de 3,28E+03 kg de madeira	Transporte de 3,28E+03 kg de madeira por 100 km	Extração da celulose, branqueamento e geração de 8,23E+03 kg de celulose branqueada	Recuperação química e geração de energia	Produção de papel e de 1000 kg de canudo	Consolidado para 1000 kg de canudos de papel
<b>ENTRADAS</b>							
Aditivos	kg					1,90E+01	1,90E+01
Agente adesivo	kg					1,00E+00	1,00E+00
Água	kg	8,98E+02		2,34E+04		1,91E+04	4,34E+04
CaCO <sub>3</sub>	kg	6,38E+01					6,38E+01
CaCO <sub>3</sub> precipitado	kg					1,05E+02	1,05E+02
CO <sub>2</sub> fixado	kg	3,16E+03					3,16E+03
Diesel	kg		1,23E+01				1,23E+01
Energia elétrica	kWh	6,27E-02		3,78E+02	7,00E+01	6,11E+02	1,06E+03
Energia térmica	kWh			1,82E+03	1,39E+03	1,60E+03	4,81E+03
Fertilizantes (NPK)	kg	2,90E+01					2,90E+01
Formicidas	kg	2,90E-01					2,90E-01
Herbicidas	L	4,60E-01					4,60E-01
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	kg			6,39E+00			6,39E+00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg			1,08E+01			1,08E+01
Metanol	kg			1,75E+00			1,75E+00
Mudas	kg	5,80E+01					5,80E+01
NaOH	kg			8,14E+00			8,14E+00
Na <sub>2</sub> S	kg			4,88E+00			4,88E+00
NaClO <sub>3</sub>	kg			1,40E+01			1,40E+01
Oxigênio líquido	kg			1,21E+01			1,21E+01
<b>SAÍDAS</b>							
<b>Produtos</b>							
Madeira	kg	3,28E+03					
Celulose branqueada	kg			8,23E+02			
Canudo de papel	kg					1,00E+03	1,00E+03
<b>Emissões atmosféricas</b>							
CH <sub>4</sub>	kg			1,16E+01			1,16E+01
CO <sub>2</sub>	kg	5,68E+00	3,84E+01	1,24E+03	3,26E+03		4,54E+03
CO	kg		6,14E-02	1,91E+02			1,91E+02
H <sub>2</sub> S	kg			3,95E-01	1,94E+00		2,33E+00

Material particulado	kg		1,18E-03	3,21E-01	5,72E-01		8,94E-01
N <sub>2</sub> O	kg		2,22E-03				2,22E-03
NO <sub>2</sub>	kg		1,09E-01	2,46E+00			2,57E+00
SO <sub>2</sub>	kg		1,89E-04	2,95E+00	5,50E-02		3,01E+00
COVs	kg			1,31E+01			1,31E+01
<b>Efluentes líquidos</b>							
DBO	kg			6,27E+00	4,26E-01	1,01E+00	7,71E+00
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>			1,49E+01	4,56E+00	1,92E+00	2,14E+01
Nitrogênio amoniacal	kg			2,88E-02			2,88E-02
Sólidos suspensos	kg			4,65E+00	5,90E-01	3,91E+00	9,15E+00
Sólidos totais	kg			3,49E+01	8,71E+00	6,13E+00	4,98E+01
<b>Resíduos sólidos</b>							
Aparas de papel	kg					9,85E+01	9,85E+01
Cascas	kg			1,07E+02			1,07E+02
Nós e palitos	kg			4,35E+01			4,35E+01
Resíduos de processo	kg	2,49E+00		4,95E+00	3,49E-02		7,47E+00
Lodo	kg			1,09E+02			1,09E+02

## 4.3.2. Análise de Inventário para o canudo de PP

### 4.3.2.1. ICV para o subsistema de extração de petróleo e refino do petróleo

No ciclo de vida do canudo de PP, o petróleo cru é submetido ao refino e são obtidas as suas várias frações; entre elas, a nafta. Esta será submetida ao craqueamento para produção do propeno, o qual irá gerar o PP, que é a matéria-prima direta para produção dos canudos por extrusão. Na obtenção dos dados para extração do petróleo, foram utilizados dados de Meili, Jungbluth e Annaheim (2018), um relatório onde é inventariado o processo de extração do petróleo cru.

A Tabela 8 apresenta o ICV de dados brutos para obtenção de 1000 kg de petróleo cru.

Tabela 8: ICV de dados brutos para a extração de 1000 kg de petróleo cru.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Água	kg	1,00E+03
Substâncias inorgânicas	kg	1,99E-01
Substâncias orgânicas	kg	1,52E-01
Energia elétrica	kWh	1,84E+01
<b>SAÍDAS</b>		
<b>Produto</b>		
Petróleo cru	kg	1,00E+03
<b>Emissões atmosféricas</b>		
CO <sub>2</sub>	kg	1,63E+02
CH <sub>4</sub>	kg	3,76E+00
CF <sub>3</sub> Br	kg	1,93E-06
CHF <sub>3</sub>	kg	7,74E-06
<b>Efluentes líquidos</b>		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	1,00E+00
Óleo não especificado	kg	9,10E-03
DBO	kg	2,42E-02
Nitrato	kg	5,92E-06
Sulfato	kg	2,05E-05
<b>Resíduos sólidos</b>		
Resíduos de processo	kg	3,60E-02

Fonte: Modificado de Meili, Jungbluth e Annaheim (2018).

Na elaboração do ICV para o refino do petróleo, foram utilizados os dados de Jungbluth, Meili e Wenzel (2018), os quais produziram um relatório onde é inventariado o processo de refino do petróleo cru, além de dados de Vianna (2006), a qual gerou um ICV para o refino no seu trabalho comparativo entre diesel e biodiesel. A Tabela 9 apresenta o ICV de dados brutos para o refino de 1000 kg de petróleo cru.

Tabela 9: ICV de dados brutos para o refino de 1000 kg de petróleo cru.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Água	kg	5,07E+02
CaCl <sub>2</sub>	kg	1,62E-02
CaO	kg	3,50E-02
Energia elétrica	kWh	4,24E+01
FeSO <sub>4</sub>	kg	5,00E-02
HCl	kg	8,90E-02
NaClO	kg	5,00E-02
NH <sub>3</sub>	kg	2,00E-03
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg	9,69E-03
Óleo lubrificante	kg	1,23E-02
Petróleo cru	kg	1,00E+03
Sabão	kg	2,68E-03
<b>SAÍDAS</b>		
<b>Emissões atmosféricas</b>		
CH <sub>4</sub>	kg	4,45E-02
CO <sub>2</sub>	kg	8,31E+00
CO	kg	2,64E-02
H <sub>2</sub> S	kg	2,09E-04
Material particulado	kg	1,50E-02
NH <sub>3</sub>	kg	1,10E-03
NO <sub>2</sub>	kg	5,84E-03
SO <sub>2</sub>	kg	4,88E-03
COVs	kg	2,26E-02
<b>Efluentes líquidos</b>		
DBO	kg	4,40E-03
Efluentes de processo	kg	5,22E+02
Cloreto	kg	1,87E-02
Fenol	kg	1,92E-05
Fosfato	kg	1,30E-04
Nitrato	kg	6,20E-03
Nitrogênio amoniacal	kg	1,20E-03
Óleo não especificado	kg	2,08E-04
Sulfato	kg	5,11E-02
Sólidos suspensos	kg	6,30E-03
<b>Resíduos sólidos</b>		
Catalisadores	kg	1,00E-03
Resíduos de processo	kg	1,95E-02
Lodo	kg	3,96E-01

Fonte: Modificado de Jungbluth, Meili e Wenzel (2018) e Vianna (2006).

Conforme pode ser verificado no ICV para o refino, não foi colocada a saída dos devidos produtos, ou seja, a quantidade de derivados produzida pelo refino de 1000 kg de petróleo cru.

Como no processo de refino do petróleo ocorre a geração de mais de um produto e o interesse está apenas no fluxo de nafta, foi conduzido um procedimento

de alocação por poder calorífico para distribuir de modo coerente, entre os diversos derivados, os aspectos ambientais gerados no processo.

Nesse procedimento, foram utilizados dados referentes a produção de derivados do petróleo no Brasil para o ano de 2018 (ANP, 2019a) e dados de densidade e poder calorífico por derivado (ANP, 2019b), obtendo percentuais que representam o que cada derivado possui no total de aspectos ambientais gerados na extração e refino do petróleo. A Tabela 10 apresenta os fatores de alocação calculados para cada derivado do petróleo que é formado.

Tabela 10: Fatores de alocação para os derivados do petróleo.

	Produção (m <sup>3</sup> )	Massa específica (t/m <sup>3</sup> )	Produção de derivados (kg)	Poder calorífico (kcal/kg)	Conteúdo energético (kcal)	Fator de alocação (%)
Gasolina A	2,51E+07	7,42E-01	1,86E+10	1,04E+04	1,93E+14	2,18E+01
Gasolina de aviação	4,62E+04	7,26E-01	3,36E+07	1,06E+04	3,56E+11	4,01E-02
GLP	1,01E+07	5,52E-01	5,57E+09	1,11E+04	6,18E+13	6,96E+00
Óleo combustível	1,07E+07	1,01E+00	1,09E+10	9,59E+03	1,04E+14	1,17E+01
Óleo diesel	4,19E+07	8,40E-01	3,52E+10	1,01E+04	3,55E+14	4,00E+01
QAV	6,38E+06	7,99E-01	5,09E+09	1,04E+04	5,30E+13	5,97E+00
Querosene iluminante	5,66E+03	7,99E-01	4,52E+06	1,04E+04	4,70E+10	5,30E-03
Asfalto	1,90E+06	1,03E+00	1,95E+09	9,79E+03	1,91E+13	2,15E+00
Coque	4,47E+06	1,04E+00	4,65E+09	8,39E+03	3,90E+13	4,39E+00
<b>Nafta</b>	<b>4,05E+06</b>	<b>7,02E-01</b>	<b>2,84E+09</b>	<b>1,06E+04</b>	<b>3,02E+13</b>	<b>3,40E+00</b>
Óleo lubrificante	6,03E+05	8,75E-01	5,28E+08	1,01E+04	5,34E+12	6,01E-01
Parafina	1,26E+05	8,20E-01	1,03E+08	1,01E+04	1,05E+12	1,18E-01
Solvente	3,36E+05	7,41E-01	2,49E+08	1,06E+04	2,62E+12	2,96E-01
Outros	2,55E+06	8,64E-01	2,20E+09	1,02E+04	2,25E+13	2,53E+00
Total	1,08E+08		8,79E+10	1,42E+05	8,88E+14	1,00E+02

Fonte: ANP (2019a) e ANP (2019b).

Como o fator de alocação calculado para a nafta é de 3,40%, podemos dizer que no refino de cerca de 29,37 toneladas de petróleo cru serão produzidos 1000 kg de nafta.

Assim sendo, a Tabela 11 apresenta o ICV de dados consolidados para a extração e refino do petróleo visando obter 1000 kg de nafta. Esse ICV foi obtido levando em consideração a extração de 29,37 toneladas de petróleo cru e o seu refino gerando 1000 kg de nafta. Para fins de repartição de cargas ambientais, será aplicado o fator de alocação de 3,40%, de modo a obter os aspectos ambientais somente para a nafta segundo o critério energético adotado.

Tabela 11: ICV de dados consolidados para a extração e refino do petróleo visando obter 1000 kg de nafta.

Aspecto ambiental	Unidade	Extração de 2,94E+04 kg de petróleo	Refino e produção de 1,00E+02 kg de nafta	Soma dos aspectos ambientais	Alocação de 3,40E+00 % para nafta	ICV de dados consolidados para produção de 1,00E+03 kg de nafta
<b>ENTRADAS</b>						
Água	kg	2,94E+04	1,49E+04	4,43E+04	1,51E+03	1,51E+03
CaCl <sub>2</sub>	kg		4,76E-01	4,76E-01	1,62E-02	1,62E-02
CaO	kg		1,03E+00	1,03E+00	3,50E-02	3,50E-02
Energia elétrica	kWh	5,40E+02	1,25E+03	1,79E+03	6,08E+01	6,08E+01
FeSO <sub>4</sub>	kg		1,47E+00	1,47E+00	5,00E-02	5,00E-02
HCl	kg		2,61E+00	2,61E+00	8,90E-02	8,90E-02
NaClO	kg		1,47E+00	1,47E+00	5,00E-02	5,00E-02
NH <sub>3</sub>	kg		5,87E-02	5,87E-02	2,00E-03	2,00E-03
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg		2,85E-01	2,85E-01	9,69E-03	9,69E-03
Óleo lubrificante	kg		3,61E-01	3,61E-01	1,23E-02	1,23E-02
Sabão	kg		7,87E-02	7,87E-02	2,68E-03	2,68E-03
Substâncias inorgânicas	kg	5,84E+00		5,84E+00	1,99E-01	1,99E-01
Substâncias orgânicas	kg	4,47E+00		4,47E+00	1,52E-01	1,52E-01
<b>SAÍDAS</b>						
<b>Produtos</b>						
Petróleo cru	kg	2,94E+04				
Nafta	kg		1,00E+03			1,00E+03
<b>Emissões atmosféricas</b>						
CH <sub>4</sub>	kg	1,10E+02	1,31E+00	1,12E+02	3,80E+00	3,80E+00
CO <sub>2</sub>	kg	4,78E+03	2,44E+02	5,02E+03	1,71E+02	1,71E+02
CF <sub>3</sub> Br	kg	5,67E-05		5,67E-05	1,93E-06	1,93E-06
CHF <sub>3</sub>	kg	2,27E-04		2,27E-04	7,74E-06	7,74E-06
CO	kg		7,75E-01	7,75E-01	2,64E-02	2,64E-02
H <sub>2</sub> S	kg		6,14E-03	6,14E-03	2,09E-04	2,09E-04
Material particulado	kg		4,41E-01	4,41E-01	1,50E-02	1,50E-02
NH <sub>3</sub>	kg		3,23E-02	3,23E-02	1,10E-03	1,10E-03
NO <sub>2</sub>	kg		1,72E-01	1,72E-01	5,84E-03	5,84E-03
SO <sub>2</sub>	kg		1,43E-01	1,43E-01	4,88E-03	4,88E-03
COVs	kg		6,65E-01	6,65E-01	2,26E-02	2,26E-02
<b>Efluentes líquidos</b>						
DBO	kg	7,10E-01	1,29E-01	8,39E-01	2,86E-02	2,86E-02

Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	2,94E+01	1,53E+01	4,47E+01	1,52E+00	1,52E+00
Cloreto	kg		5,49E-01	5,49E-01	1,87E-02	1,87E-02
Fenol	kg		5,64E-04	5,64E-04	1,92E-05	1,92E-05
Fosfato	kg		3,82E-03	3,82E-03	1,30E-04	1,30E-04
Nitrato	kg		1,82E-01	1,82E-01	6,20E-03	6,20E-03
Nitrogênio amoniacal	kg		3,52E-02	3,52E-02	1,20E-03	1,20E-03
Óleo não especificado	kg	2,67E-01	6,11E-03	2,73E-01	9,31E-03	9,31E-03
Sulfato	kg		1,50E+00	1,50E+00	5,11E-02	5,11E-02
Sólidos suspensos	kg		1,85E-01	1,85E-01	6,30E-03	6,30E-03
<b>Resíduos sólidos</b>						
Catalisadores	kg		2,94E-02	2,94E-02	1,00E-03	1,00E-03
Resíduos de processo	kg	1,06E+00	5,73E-01	1,63E+00	5,55E-02	5,55E-02
Lodo	kg		1,16E+01	1,16E+01	3,96E-01	3,96E-01

#### 4.3.2.2. ICV para o subsistema de craqueamento da nafta

Para geração desse inventário foram utilizadas informações do banco de dados de processos disponíveis no software SimaPro 7.0 (PRÉ-CONSULTANTS; 2006), o qual providenciou um ICV para produção do propeno pelo craqueamento da nafta. A Tabela 12 apresenta o ICV para o craqueamento da nafta e produção de 1000 kg de propeno.

Tabela 12: ICV de dados brutos para o craqueamento e produção de 1000 kg de propeno.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Nafta	kg	1,33E+03
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos		
Propeno	kg	1,00E+03
Efluentes líquidos		
DBO	kg	4,00E-02
Sulfato	kg	9,00E-02
Emissões atmosféricas		
CO <sub>2</sub>	kg	1,06E+03
CO	kg	5,40E-01
Material particulado	kg	3,00E-02
NO <sub>2</sub>	kg	2,01E+00
SO <sub>2</sub>	kg	2,00E-01
COVs	kg	1,41E+00

Fonte: Modificado de Pré-Consultants (2006).

#### 4.3.2.3. ICV para o subsistema de polimerização do propeno e produção do PP.

Os dados utilizados para obtenção desse inventário foram obtidos do trabalho de Cunha (2014), onde foi inventariado o filme de PP produzido no Brasil.

A Tabela 13 apresenta o ICV de dados brutos para polimerização do propeno e produção de 1000 kg de PP.

Tabela 13: ICV de dados brutos para polimerização do propeno e produção de 1000 kg de PP.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Propeno	kg	1,03E+03
Catalisadores	kg	2,06E+00
Aditivos	kg	4,24E+00
Água	kg	1,09E+04
Energia elétrica	kWh	4,65E+05
<b>SAÍDAS</b>		



Produto		
Polipropileno (PP)	kg	1,00E+03
Efluentes líquidos		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	1,90E+00
Emissões atmosféricas		
CO <sub>2</sub>	kg	3,12E+02
CO	kg	1,80E-01
NO <sub>2</sub>	kg	1,01E+00
SO <sub>2</sub>	kg	2,00E-02
Resíduos sólidos		
Catalisadores	kg	1,89E+00
Resíduos de processo	kg	1,45E+01

Fonte: Modificado de Cunha (2014).

#### 4.3.2.4. ICV para o subsistema de extrusão do PP e produção do canudo

Na obtenção dos dados para extrusão e produção do canudo de PP foram utilizados os dados do trabalho de Becker Jr. et al. (2016), autores que elaboraram um balanço de massa para as cadeias de transformação do plástico no Brasil.

Também foram utilizados os dados do trabalho de Boonniteewanicha et al. (2014), que calcularam a pegada de carbono do processo de produção do canudo de PP. A Tabela 14 apresenta o ICV de dados brutos para extrusão e produção de 1000 kg de canudos de PP.

Tabela 14: ICV de dados brutos para extrusão e produção de 1000 kg de canudos de PP.

Aspecto ambiental	Unidade	Quantidade
<b>ENTRADAS</b>		
Polipropileno (PP)	kg	1,01E+03
Água	kg	4,30E+02
Aditivos	kg	2,00E+01
Energia elétrica	kWh	1,60E+02
<b>SAÍDAS</b>		
Produto		
Canudos de PP	kg	1,00E+03
Emissões atmosféricas		
CO <sub>2</sub>	kg	1,48E+02
Efluentes líquidos		
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	4,30E-01
Resíduos sólidos		
Resíduos de processo	kg	1,01E+01

Fonte: Modificado de Becker Jr. et al. (2016) e Boonniteewanicha et al. (2014).

#### 4.3.2.5. ICV consolidado para a produção de canudo de PP

Como ICVs para extração e refino do petróleo, craqueamento da nafta, polimerização do propileno, extrusão do PP e produção dos canudos já foram obtidos anteriormente, a obtenção do ICV consolidado para produção do canudo de PP foi dada pela conversão dos fluxos para a unidade funcional.

Deste modo, verificou-se que para produção de 1000 kg de canudos de PP serão necessários: 1010 kg de PP obtidos pela polimerização de 1040 kg de propeno, o qual foi obtido pelo craqueamento de 1384 kg de nafta. Levando em consideração que o ICV consolidado para Nafta (Tabela 21) já engloba os aspectos ambientais da extração e refino do petróleo cru alocados com 3,40% para o derivado nafta, obteve-se o ICV consolidado para o canudo de PP que é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de PP.

Aspecto ambiental	Unidade	Extração e refino do petróleo cru para produção de 1,38E+03 kg de nafta	Craqueamento da nafta e produção de 1,04E+03 kg de propeno	Polimerização do propeno e produção de 1,01E+03 kg de PP	Extrusão do PP e produção de 1,00E+03 kg de canudos	ICV consolidado para produção de 1000 kg de canudos de PP
<b>ENTRADAS</b>						
Aditivos	kg			4,28E+00	2,00E+01	2,43E+01
Água	kg	2,09E+03		1,10E+04	4,30E+02	1,35E+04
CaCl <sub>2</sub>	kg	2,24E-02				2,24E-02
CaO	kg	4,84E-02				4,84E-02
Catalisadores	kg			2,08E+00		2,08E+00
Energia elétrica	kWh	8,41E+01		4,70E+05	1,60E+02	4,70E+05
FeSO <sub>4</sub>	kg	6,92E-02				6,92E-02
HCl	kg	1,23E-01				1,23E-01
NaClO	kg	6,92E-02				6,92E-02
NH <sub>3</sub>	kg	2,77E-03				2,77E-03
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg	1,34E-02				1,34E-02
Óleo lubrificante	kg	1,70E-02				1,70E-02
Sabão	kg	3,71E-03				3,71E-03
Substâncias inorgânicas	kg	2,75E-01				2,75E-01
Substâncias orgânicas	kg	2,10E-01				2,10E-01
<b>SAÍDAS</b>						
<b>Produtos</b>						
Canudos de PP	kg				1,00E+03	1,00E+03
Polipropileno (PP)	kg			1,01E+03		
Propeno	kg		1,04E+03			
Nafta	kg	1,38E+03				
<b>Emissões atmosféricas</b>						
CH <sub>4</sub>	kg	5,26E+00				5,26E+00
CO <sub>2</sub>	kg	2,37E+02	1,10E+03	3,15E+02	1,48E+02	1,80E+03
CF <sub>3</sub> Br	kg	2,67E-06				2,67E-06
CHF <sub>3</sub>	kg	1,07E-05				1,07E-05
CO	kg	3,65E-02	5,62E-01	1,82E-01		7,80E-01
H <sub>2</sub> S	kg	2,89E-04				2,89E-04

Material particulado	kg	2,08E-02	3,12E-02			5,20E-02
NH <sub>3</sub>	kg	1,52E-03				1,52E-03
NO <sub>2</sub>	kg	8,08E-03	2,09E+00	1,02E+00		3,12E+00
SO <sub>2</sub>	kg	6,75E-03	2,08E-01	2,02E-02		2,35E-01
COVs	kg	3,13E-02	1,47E+00			1,50E+00
<b>Efluentes líquidos</b>						
DBO	kg	3,95E-02	4,16E-02			8,12E-02
Efluentes de processo	m <sup>3</sup>	2,11E+00		1,92E+00	4,30E-01	4,46E+00
Cloreto	kg	2,59E-02				2,59E-02
Fenol	kg	2,66E-05				2,66E-05
Fosfato	kg	1,80E-04				1,80E-04
Nitrato	kg	8,58E-03				8,58E-03
Nitrogênio amoniacal	kg	1,66E-03				1,66E-03
Óleo não especificado	kg	1,29E-02				1,29E-02
Sulfato	kg	7,07E-02	9,36E-02			1,64E-01
Sólidos suspensos	kg	8,72E-03				8,72E-03
<b>Resíduos sólidos</b>						
Catalisadores	kg	1,38E-03		1,91E+00		1,91E+00
Resíduos de processo	kg	7,68E-02		1,47E+01	1,01E+01	2,49E+01
Lodo	kg	5,48E-01				5,48E-01

#### 4.4. Avaliação de impactos ambientais e interpretação

A AICV será realizada levando em consideração os dados inventariados para os dois sistemas de produto propostos. As comparações serão realizadas apresentando os dados por subsistema e consolidados.

##### 4.4.1. Potencial de aquecimento global

As Figuras 13 e 14 apresentam o balanço das emissões de CO<sub>2</sub> para os subsistemas que compõem os sistemas de produto do canudo de papel e de PP.

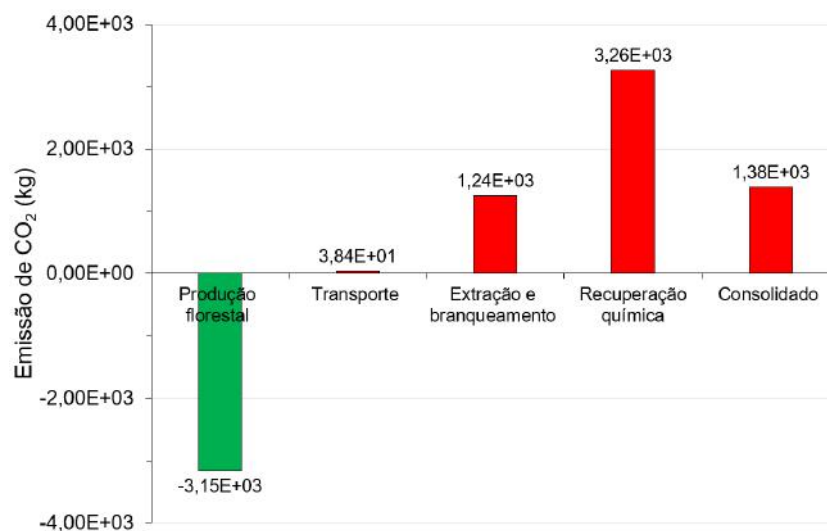


Figura 13: Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> na produção do canudo de papel.

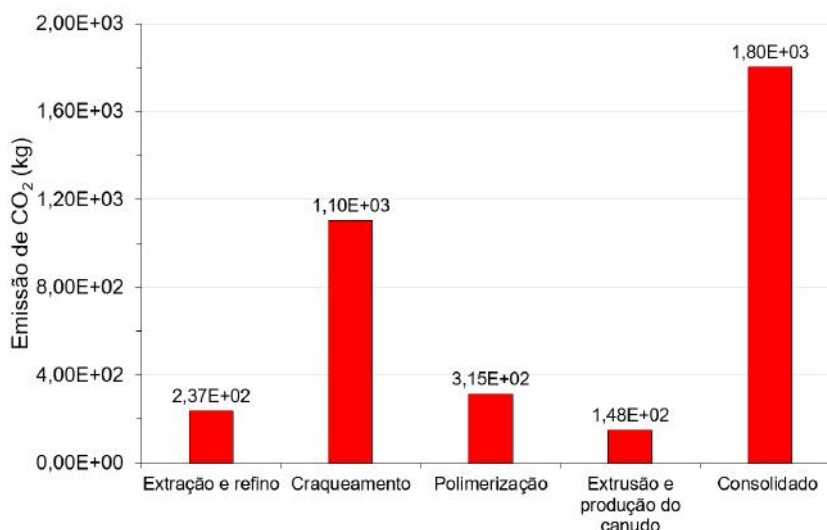


Figura 14: Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> na produção do canudo de plástico.

As Figuras 15 e 16 apresentam o PAG para os subsistemas que compõem os sistemas de produto do canudo de papel e de PP.

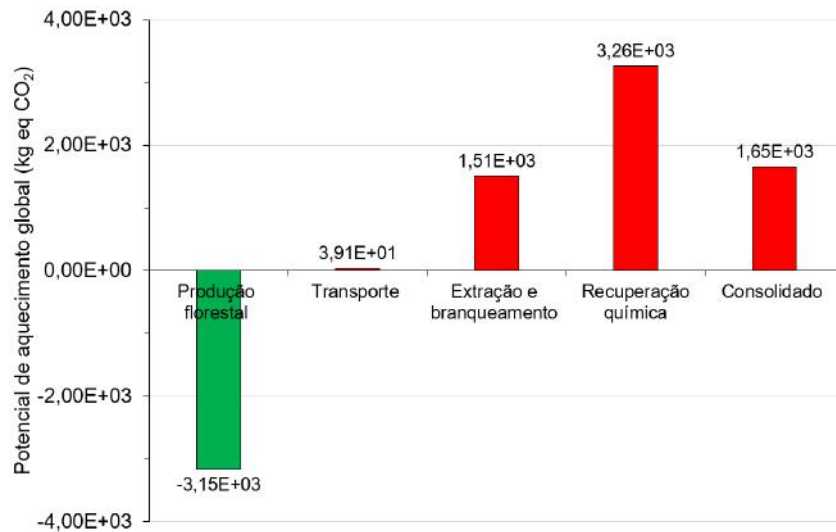


Figura 15: PAG na produção do canudo de papel.

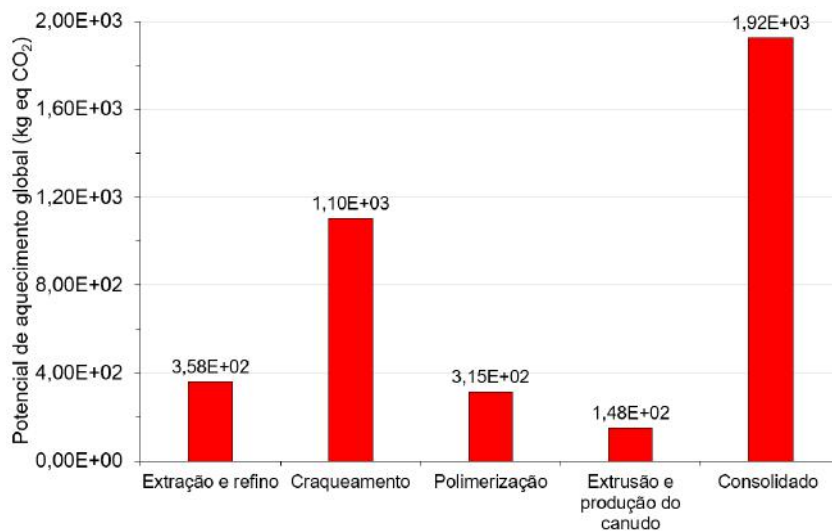


Figura 16: PAG na produção do canudo de PP.

Conforme se pode verificar nas Figuras de 13 a 16, o canudo de papel apresenta menor PAG e emissão de CO<sub>2</sub>. No ciclo de vida do canudo de papel, a produção florestal retira por meio de fotossíntese cerca de 3,15 toneladas de CO<sub>2</sub> da atmosfera, o que auxilia nesse resultado. Já no ciclo de vida do canudo de plástico, só ocorrem as emissões de CO<sub>2</sub> e demais gases estufa, sem nenhuma etapa de absorção.

Observa-se, também, pelas Figuras 13 a 16, que os subsistemas de recuperação química do licor negro, na produção do canudo de papel, e o craqueamento da nafta, na produção do canudo de plástico, foram aqueles com maior indicador de impacto ambiental em kg eq. CO<sub>2</sub> em cada um dos sistemas de produto analisados.

Essa identificação é uma aplicação típica da ACV (identificação dos pontos críticos no ciclo de vida de produtos), e partir daí devem ser utilizadas ferramentas de controle de tais emissões atmosféricas ou modificações no processo visando que tais emissões não ocorram, o que está fora do escopo da ACV.

Dentre todos os subsistemas, o de recuperação química na produção do canudo de papel é aquele com maior PAG (Figura 17), isso ocorre devido ao CO<sub>2</sub> gerado no forno de cal e na queima do licor negro concentrado para gerar energia.

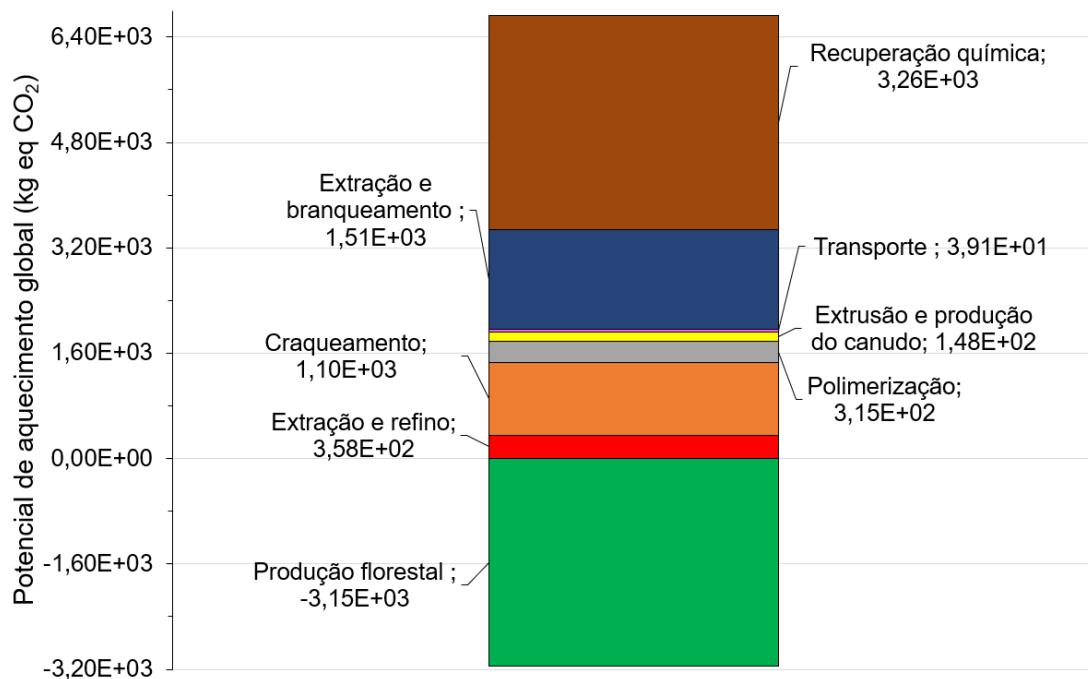


Figura 17: Comparação do PAG entre todos os subsistemas.

Um fato importante é que o indicador de PAG para o canudo de plástico poderia ser muito maior caso fosse considerado o transporte marítimo da nafta até o Brasil, atividade na qual o combustível fóssil utilizado pelo navio será queimado e o CO<sub>2</sub> resultante irá computar um PAG adicional para o canudo de plástico.

Atualmente, é essa situação que está ocorrendo, uma vez que a produção nacional de nafta é inferior ao volume demandado, o que torna o Brasil um importador líquido dessa matéria-prima (EPE, 2018).

#### 4.4.2. Potencial de acidificação

As Figuras 18 e 19 apresentam o PA para os subsistemas que compõem os sistemas de produto do canudo de papel e PP.

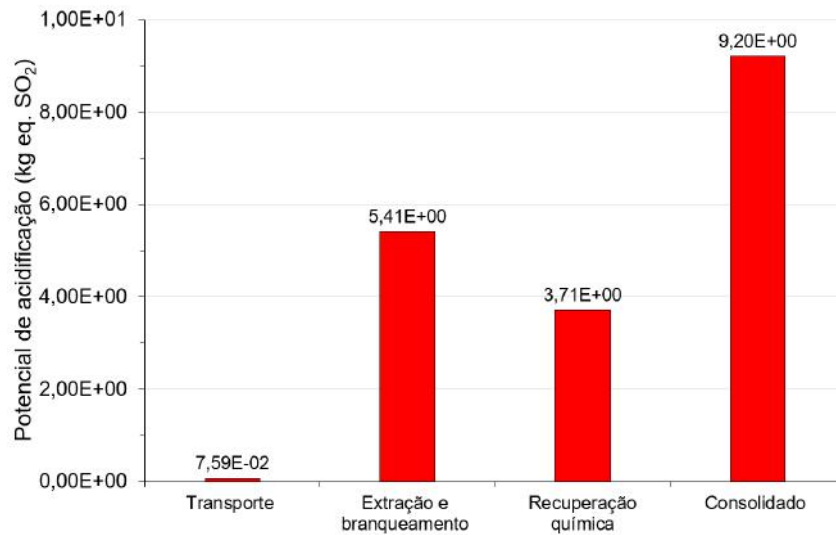


Figura 18: PA na produção do canudo de papel.

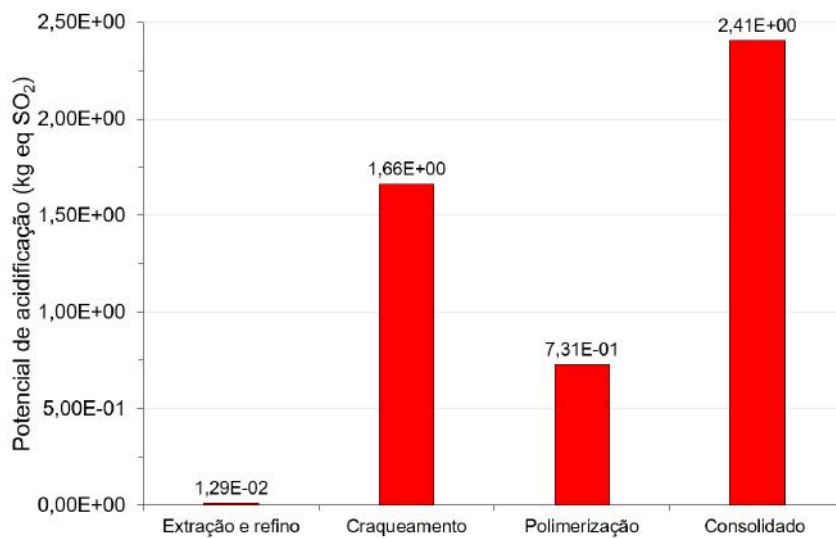


Figura 19: PA na produção do canudo de PP.



Conforme pode ser verificado pelas Figuras 18 e 19, o PA do canudo de papel é quase 3,82 vezes o do canudo de PP.

Possivelmente, essa diferença é devida ao percentual de enxofre na madeira, a qual é fervida com outros componentes químicos que possuem enxofre (sulfeto, sulfato e sulfito de sódio) na etapa de extração e branqueamento, liberando gases sulfurosos e nitrogenados que podem reagir e gerar ácidos atmosféricos.

Outra etapa que contribuiu é a de recuperação química, devido à queima do licor negro concentrado, a qual gera gases ácidos. De modo geral, a emissão de gases sulfurosos é intrínseca do processo Kraft de polpação (SOUZA, 1988).

Quando todos os subsistemas são comparados, conforme a Figura 20, fica evidente que a produção do canudo de papel é muito mais impactante para o meio ambiente no que se refere ao indicador de PA, com os subsistemas de extração e branqueamento da polpa e recuperação química emitindo muito mais gases ácidos, o que lhes conferiu altos PA.

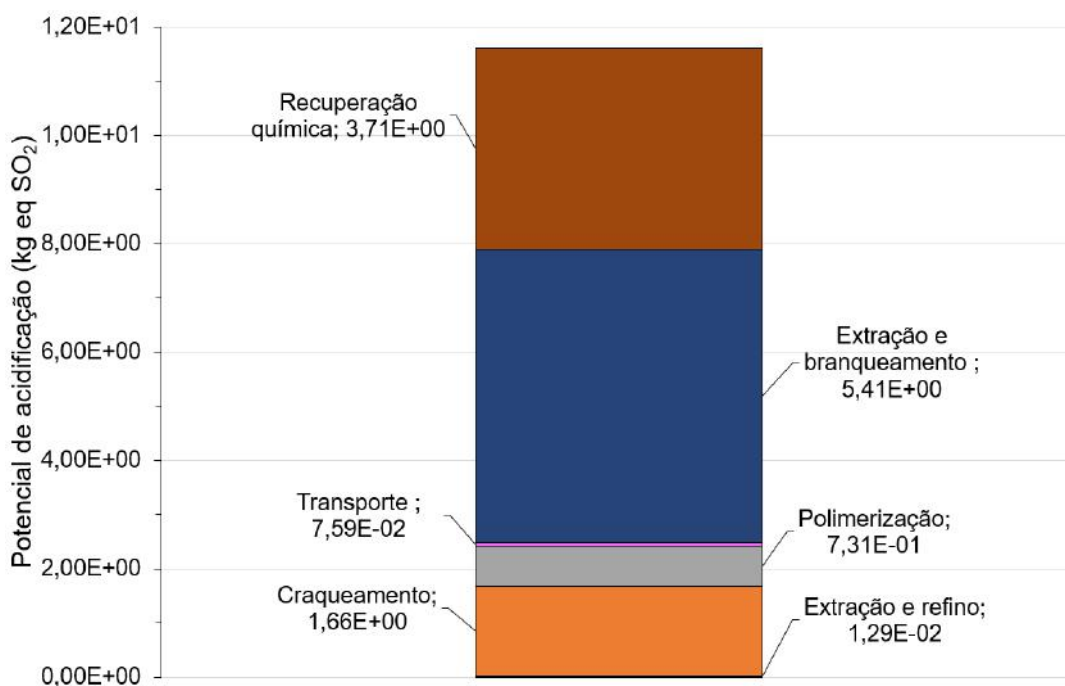


Figura 20: Comparação de PA entre todos os subsistemas.

#### 4.4.3. Consumo biológico de oxigênio

As Figuras 21 e 22 apresentam o CBO para os subsistemas que compõem os sistemas de produto do canudo de papel e PP.

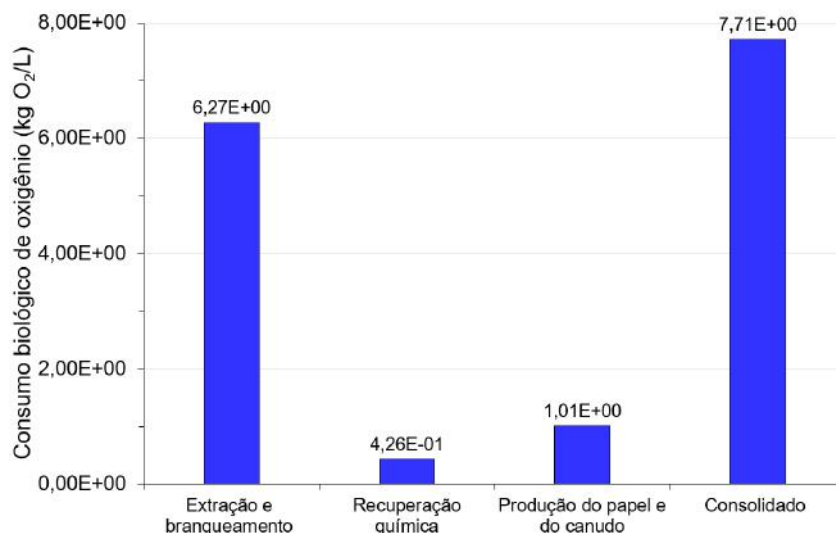


Figura 21: CBO para a produção de canudo de papel.

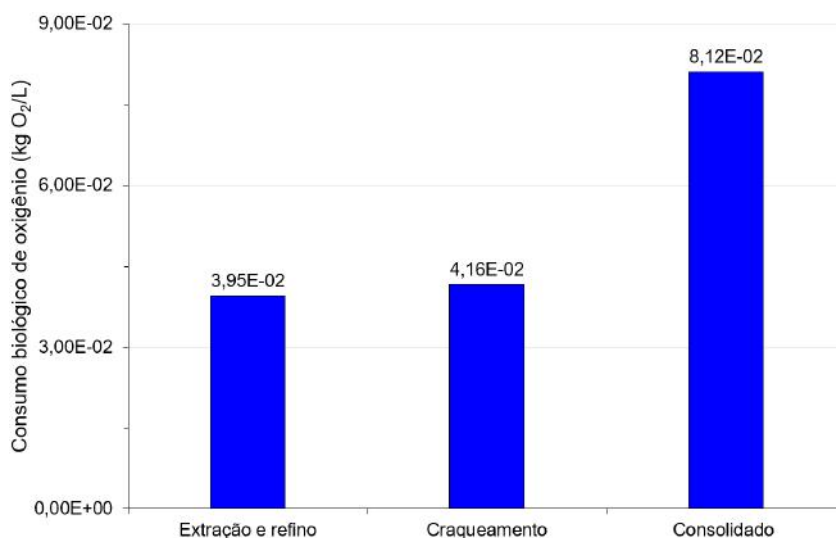


Figura 22: CBO para a produção de canudo de PP.

Conforme pode ser verificado nas Figuras 21 e 22, o CBO para o canudo de papel é quase 95 vezes o valor da CBO para o canudo de PP. Uma comparação mais clara é apresentada na Figura 23. A princípio, a ausência de dados de DBO para os efluentes da polimerização e extrusão do canudo colaboraram para essa diferença.

Por outro lado, sabe-se que os efluentes gerados na produção de papel têm um alto conteúdo de DBO e várias concentrações de outros contaminantes que dependem dos tipos de processos aplicados. Essa indústria produz a terceira maior quantidade de águas residuais, depois das indústrias primárias de metais e produtos químicos (ASHRAFI, YERUSHALMI E HAGHIHAT; 2015).

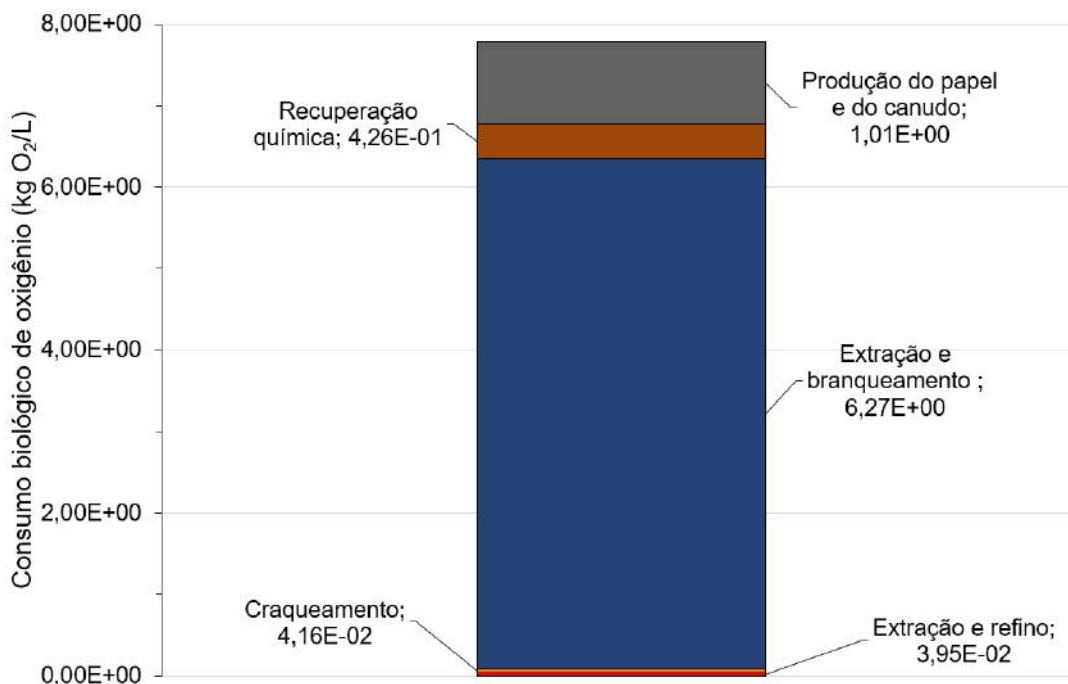


Figura 23: Comparação de CBO entre todos os subsistemas.

Segundo estudo publicado pelo Banco Mundial, no Canadá a indústria de papel e celulose produz entre 20-30 m<sup>3</sup> de águas residuais por tonelada de papel. Essas águas residuais contêm uma variedade de contaminantes orgânicos e inorgânicos que se originam principalmente de taninos, ligninas, resinas e compostos de cloro (THE WORLD BANK, 1999).

Comparativamente, na produção da polpa branqueada do sistema de produto do canudo de papel, conforme ICV da Tabela 7, são gerados 14,9 m<sup>3</sup> de efluentes de processo na extração e branqueamento, além de 4,56 m<sup>3</sup> na recuperação química, totalizando 19,46 m<sup>3</sup>. Já na produção do canudo de PP são gerados 4,46 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.4. Consumo de Recursos Naturais

As Figuras 24 e 25 apresentam o CRN para os subsistemas que compõem os sistemas de produto do canudo de papel e PP. Esse CRN será calculado para aspecto ambiental de entrada de água (kg).

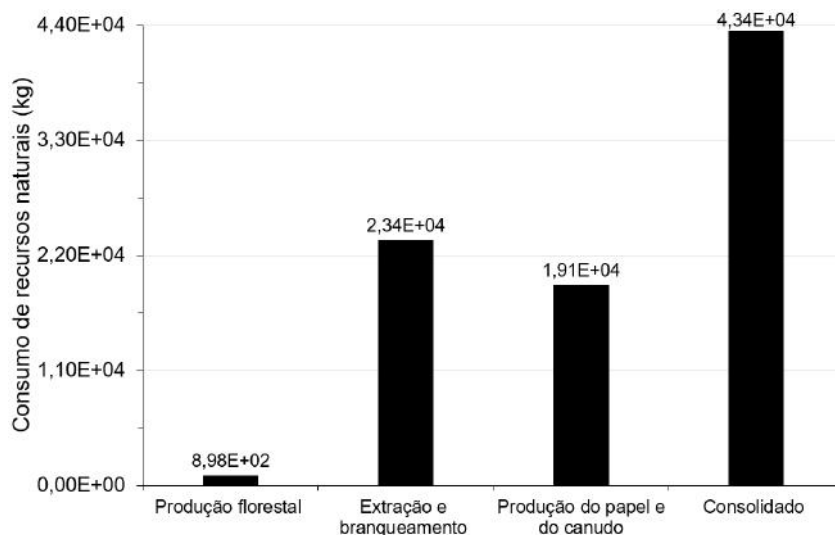


Figura 24: CRN (água) para produção do canudo de papel.

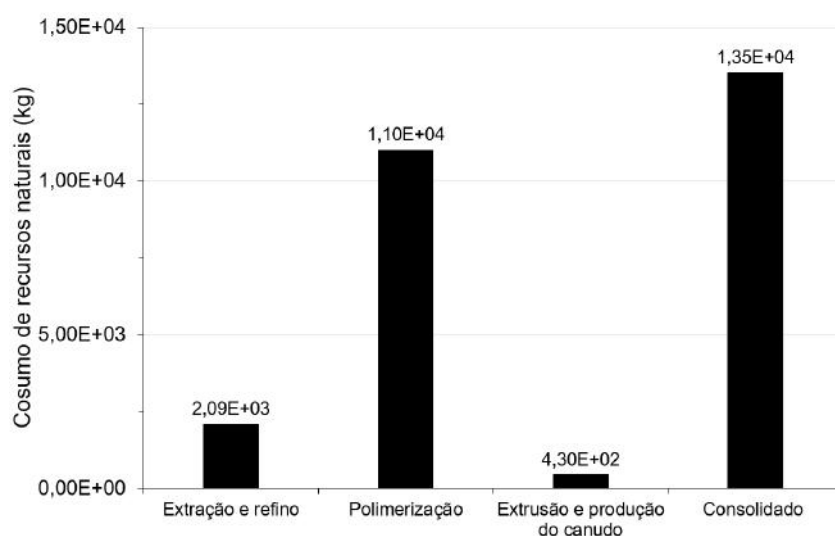


Figura 25: CRN (água) para produção do canudo de PP.

De acordo com as figuras 24 e 25, o CRN referente ao consumo de água na produção do canudo de papel é cerca de 3,21 vezes o CRN para produção do canudo de PP.

Os subsistemas de extração e branqueamento da celulose, e de produção do papel e do canudo representam os pontos críticos de acordo com esse indicador. Quando todos os subsistemas são comparados quanto ao CRN (Figura 26), fica ainda mais evidente esses dois subsistemas são as etapas que mais demandam água.

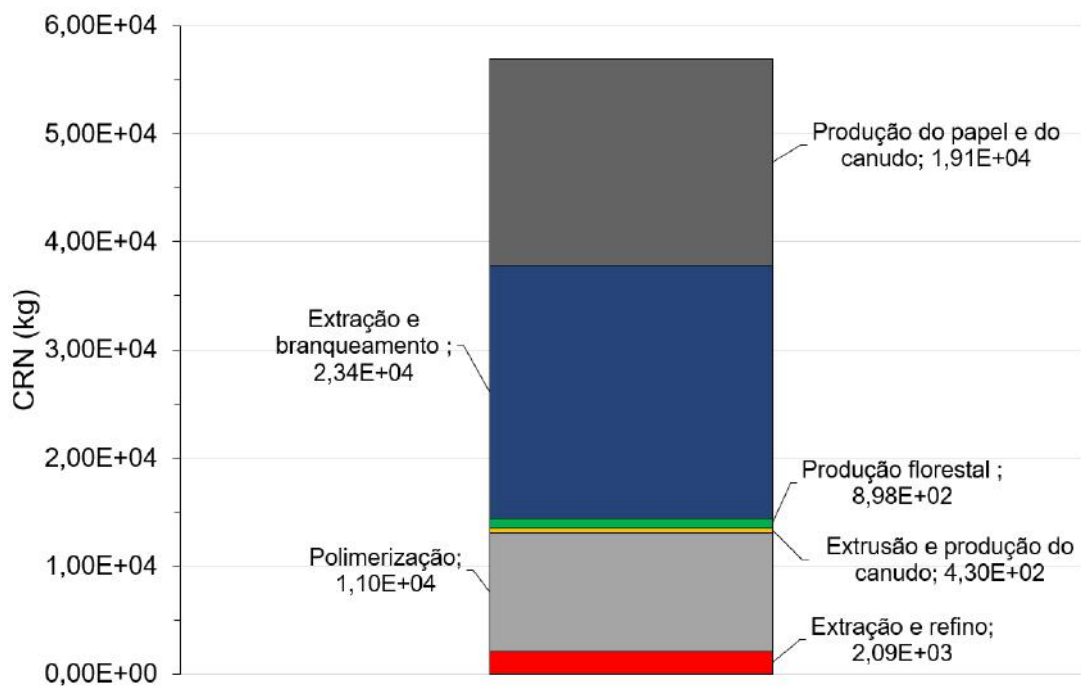


Figura 26: Comparação do CRN (água) para todos os subsistemas

## 5. CONCLUSÕES

Ao longo do trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica de como são os processos de produção dos canudos de polipropileno e de papel e da metodologia da ACV. Após a revisão bibliográfica, foram definidos o objetivo e escopo da ACV, e coletados os dados para os ICVs de cada subsistema definido no escopo. Os dados também foram consolidados para cada sistema de produto analisado. Por fim, de posse desses dados, foi feita a avaliação dos impactos ambientais nas categorias de Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Consumo Biológico de Oxigênio e Consumo de Recursos Naturais. Além disso, foram comparados os subsistemas entre si e os consolidados de cada sistema de produto, para cada categoria de impacto.

Na AICV, verificou-se que o canudo de plástico teve desempenho pior que o canudo de papel em apenas uma categoria de impacto, Potencial de Aquecimento Global, com geração de 16,4% a mais de CO<sub>2</sub> eq do que o canudo de papel. Isso ocorre principalmente devido à etapa de craqueamento da nafta, que contribui com 57,3% do valor total de emissão de gases estufa do canudo de plástico. O melhor desempenho do canudo de papel nessa categoria se deve, principalmente, à absorção de CO<sub>2</sub> durante a etapa de produção florestal da madeira.

Já o canudo de papel teve desempenho pior nas categorias de Potencial de Acidificação, Consumo Biológico de Oxigênio e Consumo de Recursos Naturais. Na categoria de PA, observou-se que o canudo de papel gera 282% a mais de emissão de SO<sub>2</sub> eq; na categoria de CBO, 9400% a mais de DBO; e na categoria de CRN, 221% a mais de consumo de água. Além disso, nas três categorias, a principal responsável por esses altos números foi a etapa de extração e branqueamento da celulose, que utiliza muita água e produtos químicos para tratar a madeira, e gera efluentes ricos em matéria orgânica.

Dessa forma, conclui-se que os impactos ambientais gerados por cada produto têm perfis diferentes: enquanto o canudo de plástico é o que mais contribui para a aceleração das mudanças climáticas, o canudo de papel contribui mais para outros problemas ambientais, como chuva ácida, desequilíbrio de ecossistemas aquáticos e consumo excessivo de água. Portanto, a escolha por um ou por outro deve passar por uma análise de quais desses problemas ambientais são mais prioritários no momento, também levando em conta que os aumentos percentuais dos impactos gerados pelo

canudo de papel em PA, CBO e CRN são muito maiores do que o gerado pelo canudo de plástico em PAG.

Além da comparação entre sistemas de produto, a ACV também é muito útil para entender quais subsistemas de cada sistema de produto geram mais impactos ao meio ambiente, considerando as categorias de impacto selecionadas na fase de definição de escopo. Para o sistema do canudo de plástico, temos o craqueamento da nafta, que apresentou o pior desempenho nas categorias de PAG, PA e CBO, e a polimerização do propeno, que apresentou os maiores números de CRN. No caso do sistema do canudo de papel, os subsistemas mais problemáticos seriam o de recuperação química, com o maior PAG, e o de extração e branqueamento da celulose, com os piores resultados nas categorias de PA, CBO e CRN.

O resultado que aponta o canudo de papel como mais impactante que o canudo de plástico em determinadas categorias pode parecer contra-intuitivo, mas isso apenas demonstra que é necessário fazer estudos mais aprofundados antes de tomar decisões que impactam o meio ambiente, ou pode-se fazer mudanças que parecem vantajosas ao senso comum, mas que, na realidade, escondem outros problemas não tão evidentes à primeira vista.

Também se deve considerar que existem outras possibilidades para a produção de canudos, além do polipropileno de origem fóssil e do papel, como biopolímeros e PP verde, que estão atualmente em desenvolvimento, e têm possibilidade de desempenho ambiental melhor que os dois anteriores. Além disso, existem os canudos reutilizáveis, como os de bambu e de metal, que são vantajosos por serem produzidos e comercializados em menor escala, além de gerarem menos resíduos; no entanto, são mais caros e geram mais impactos durante a fase de utilização, por causa da lavagem.

Finalmente, é importante salientar que os resultados apresentados são preliminares e estão sujeitos às limitações descritas na definição de escopo da ACV. Para uma melhor comparação entre os dois produtos, será necessário prosseguir com o estudo, incluindo os aspectos relativos à produção das entradas consideradas como fluxos elementares e o transporte da nafta importada, por exemplo. Além disso, seria interessante estender o escopo da ACV, para considerar todo o ciclo de vida dos produtos, até a disposição final, o que forneceria uma visão muito mais ampla dos impactos gerados por cada sistema.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019**. Rio de Janeiro/RJ, 2019a.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores: valores médios para o ano de 2018**, 2019b. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-fatores-de-conversao.pdf>. Acesso em: 04/12/2019.

ASHRAFI, O.; YERUSHALMI, L.; HAGHIGHAT, F. **Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission**. *Journal of Environmental Management*, 158, 146–157, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:2009: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:2009: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL (ABTCP). **Balanco de massa e energia da Caldeira de Recuperação da Fibria em Jacareí/SP**, 2012. Disponível em: [http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2012\\_Balanzo\\_massa\\_energia\\_Fibria\\_Jacarei.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2012_Balanzo_massa_energia_Fibria_Jacarei.pdf). Acesso em: 01/12/2019.

BECKER *et al.* **Desenvolvimento de base de dados ambiental para a cadeia de transformação de plástico no Brasil: primeiros avanços**. Edição Especial V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida | 2016 | 48-62, 2016.

BOONNITEEWANICH *et al.* **Evaluation of Carbon Footprint of Bioplastic Straw Compared to Petroleum based Straw Products**. *Energy Procedia*, 56, 518–524, 2014.

BRÁSIA LTDA. **Máquina para Canudinhos de Papel**. Disponível em: <https://www.brasialtda.com.br/produto/maquina-para-canudinhos-de-papel>. Acesso em: 6 out. 2019.

BLUNT, M.; FAYERS, F. J.; ORR, F. M. **Carbon dioxide in enhanced oil recovery**. *Energy Conversion and Management*, Palo Alto, v. 34, n. 9-11, p. 1197-1204, 1993.

CARVALHO, L. B. **Produção de polipropileno bi-orientado (bopp): Tecnologia e aplicações**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.



COMPANHIA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA EM SANEAMENTO BÁSICO (CETESB). **Nota técnica (NT - 18) sobre tecnologia de controle: fabricação de celulose (Kraft) e papel.** São Paulo, 1990.

COMPANHIA PERNANBUCANA DE MEIO AMBIENTE (CPRH); DEUSTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT (GTZ). **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização: indústria de papel e celulose.** Projeto Brasil - Alemanha. Recife, 1998.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 1/86, de 23 de janeiro de 1986.** Brasília, DF, 1986.

CUNHA, R. N. **Inventário do ciclo de vida do filme de BOPP produzido no Brasil.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Engenharia de Produção, 2014.

ECOINVENT 3.3. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation: transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5,** 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil.** Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-topico-412/NT%20Refino%20e%20Petroqu%C3%ADmica\\_2018.11.01.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-topico-412/NT%20Refino%20e%20Petroqu%C3%ADmica_2018.11.01.pdf). Acesso em: 12/10/2019.

GALDIANO, G. P. **Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo/SP, 2006.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made.** *Science Advances*, Santa Barbara, v. 3, n. 7, 2017

HOLLENBERG, D. **Drinking straw prepared from flattened polymeric tubular conduit, method of making same and dispenser therefor.** Depositante: Dixie Consumer Products LLC. US20020134850A1. Depósito: 14 mar. 2002. Concessão: 18 mai. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2017.** Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/15f538e9095614fc3204f828b22fa714.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/15f538e9095614fc3204f828b22fa714.pdf). Acesso em 10/10/2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: The Scientific Basis.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp, 2001.

IPT e SENAI. **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2ª ed. Vol. I, 1988.

IPT e SENAI. **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação do papel.** Vol. II, 1982.

JUNGBLUTH, N.; MEILI, C.; WENZEL, P. **Life cycle inventories of oil refinery processing and products**, 2018.

LAIST, D. W. **Overview of the Biological Effects of Lost and Discarded Plastic Debris in the Marine Environment**. *Marine Pollution Bulletin*, Washington, D. C., v. 18, n. 6B, p. 319-326, 1987.

LIA, C. G. J. B.; VASCONCELOS, A. M. **Consumo de canudos plásticos em bares e restaurantes de Campo Grande-MS**. 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu, 2019.

MEILI, C.; JUNGBLUTH, N.; ANNAHEIM, J. **Life cycle inventories of crude oil extraction**, 2018.

MORAN, M. **An environmental and cost comparison between polypropylene plastic drinking straws and a “greener” alternative: An Oberlin case study**. 2018. *Honor Thesis*. Oberlin College, Oberlin.

O’ROURKE, D.; CONNOLLY, S. **Just Oil? The Distribution of Environmental and Social Impacts of Oil Production and Consumption**. *Annual Review of Environment and Resources*, Berkeley, v. 28, n. 1, p. 587-617, 2003.

PETRY, A. **Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PIOTTO, Z. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRÉ-CONSULTANTS. **Data Archive: propene (propylene) production**. SimaPro. Versão 7, 2006.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 6.384, de 4 de julho de 2018**. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 6.458, de 8 de janeiro de 2019**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

RIO DE JANEIRO. **Projeto de lei nº 981/2018**. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

SAMUDRO, G.; MANGKOEDIHARDJO, S. **Review on BOD, COD and BOD/COD ratio: a triangle zone for toxic, biodegradable and stable levels**. *International Journal of Academic Research*, Semarang, v. 2, n. 4, p. 235-239, 2010.

SOUZA, T. L. C. de. **Sulphur Gas Analysis in the Pulp and Paper Industry**. *JAPCA*, 38(6), 792–795, 1988.

SZARGUT, J.; ZIĘBIK, A.; STANEK, W. **Depletion of the non-renewable natural energy resources as a measure of the ecological cost.** *Energy Conversion and Management*, Gliwice, v. 43, p. 1149-1163, 2022.

STRANDDORF *et al.* **Impact categories, normalisation and weighting in LCA.** *Environmental News*, Copenhagen, v. 78, 2005.

SUN, M.; WANG, Y.; SHI, L. **Environmental performance of straw-based pulp making: A life cycle perspective.** *Science of The Total Environment*, 616-617, 753–762, 2018.

THE WORLD BANK GROUP. **Pollution prevention and abatement handbook, 1998: toward cleaner.** Washington D.C., 1999.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIANNA, F. C. **Análise de ecoeficiência: avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2006.

VIEIRA, T. M.; DUARTE, G. W. **Estudo da incorporação de resíduos da indústria de canudos descartáveis na fabricação de *pavers* de concreto.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23., 2018, Foz do Iguaçu.