

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

**A RECICLAGEM QUÍMICA COMO ALTERNATIVA AO TRATAMENTO DE
RESÍDUOS PLÁSTICOS NO BRASIL**

GUILHERME MONTEIRO AVELINO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao
Curso de Engenharia Química, da Universidade
Federal de São Carlos – UFSCar.

Orientador: Prof^ª. Dr^a Vadila Giovana Guerra Bettega

São Carlos,

2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 15 de dezembro de 2020, perante a seguinte banca:

Orientador (a): Prof^ª Dr^ª. Vadila Giovana Guerra Bettega (Orientadora)

Convidado (a): Tássia Viol Moretti de Paula (Grupo Boticário)

Professor (a) da Disciplina: Prof^º. Dr. Ruy de Sousa Jr. (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora *Vádila*, que me auxiliou com muita vontade e receptividade desde a escolha do tema até a conclusão do trabalho.

Sou grato também ao *Grupo Boticário* e todos os colaboradores que me auxiliaram no início da construção do trabalho, especialmente a colaboradora *Tassia Moretti* pelas informações e discussões que ela me proporcionou sobre o tema.

RESUMO

AVELINO, Guilherme Monteiro. **A reciclagem química como alternativa ao tratamento de resíduos plásticos no Brasil**. 2020. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Engenharia Química] Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2020.

A reciclagem é um processo realizado na transformação de produtos. Esta pode ser realizada de forma mecânica, química e energética. Em cada um dos tipos delimitados encontra-se processos diferenciados, bem como os produtos e matérias-primas finais. Diante disto, o presente estudo buscou compreender os desafios que a gaseificação, enquanto metodologia de reciclagem química, enfrentada no Brasil e como eles podem ser superados para que esse método seja uma alternativa viável junto a reciclagem mecânica, de modo a melhorar o tratamento de resíduos plásticos em nosso país. Para tanto, o estudo partiu de uma revisão bibliográfica acerca da reciclagem mecânica e a química no Brasil, analisando criticamente alguns processos e as variáveis que os envolvem, além de discorrer sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais que cada tratamento possui. Os resultados obtidos permitiram concluir que a reciclagem mecânica encontra-se como principal recurso de reciclagem realizado no Brasil. A reciclagem mecânica é financeiramente mais efetiva quando comparado aos outros dois tipos de reciclagem praticados, além de propiciar empregabilidade no setor. Constatou-se também que a logística reversa, garantida por lei, possibilita o destino certo para o tratamento de resíduos sólidos, devendo ser maior explorada. Entretanto, há que se considerar que a reciclagem mecânica apresenta variáveis que dificultam o seu uso, uma vez que determinados resíduos plásticos não podem ser reciclados por este processamento. Assim, torna-se necessário o investimento em reciclagem química, porém compreende-se a demanda financeira que a mesma exige. Ressalta-se a sustentabilidade como fator preponderante neste cenário, devendo ser considerado nos diferentes processos de reciclagem. Por fim, conclui-se que a gaseificação, explorada pelo pesquisador neste estudo, apresenta-se como uma alternativa para o tratamento de resíduos plásticos, assim, afirma-se a necessidade de maiores estudos exploratórios na área pesquisada.

Palavras-Chave: Reciclagem; Reciclagem Química; Reciclagem Mecânica; Gaseificação; Resíduos Plásticos

ABSTRACT

AVELINO, Guilherme Monteiro. **Chemical recycling as an alternative to the treatment of plastic waste in Brazil**. 2020. 64f. Course Conclusion Paper [Graduation in Chemical Engineering] Federal University of São Carlos - UFSCar, São Carlos, 2020.

Recycling is a process carried out in the transformation of products. This can be done mechanically, chemically and energetically. In each of the defined types there are different processes, as well as the final products and raw materials. Given this, the present study sought to understand the challenges that gasification, as a chemical recycling methodology, faced in Brazil and how they can be overcome so that this method is a viable alternative with mechanical recycling, in order to improve waste treatment plastics in our country. To this end, the study started from a bibliographic review about mechanical recycling and chemistry in Brazil, critically analyzing some processes and the variables that involve them, in addition to discussing the social, economic and environmental impacts that each treatment has. The results obtained allowed us to conclude that mechanical recycling is the main recycling resource carried out in Brazil. Mechanical recycling is financially more effective when compared to the other two types of recycling practiced, in addition to providing employability in the sector. It was also found that reverse logistics, guaranteed by law, allows the right destination for the treatment of solid waste, and should be further explored. However, it must be considered that mechanical recycling has variables that hinder its use, since certain plastic residues cannot be recycled by this processing. Thus, investment in chemical recycling is necessary, but the financial demand that it requires is understood. Sustainability is highlighted as a major factor in this scenario, and should be considered in the different recycling processes. Finally, it is concluded that gasification, explored by the researcher in this study, presents itself as an alternative for the treatment of plastic waste, thus, the need for further exploratory studies in the researched area is stated.

Keywords: Recycling; Chemical Recycling; Mechanical Recycling; Gasification; Plastic Waste

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
1. SUSTENTABILIDADE E A PRODUÇÃO DE LIXO NO BRASIL.....	12
2. RESÍDUOS PLÁSTICOS	16
3. RECICLAGEM	22
3.1. Tipos de Reciclagem.....	26
3.2. Reciclagem Mecânica	26
3.3. Reciclagem Química.....	32
3.4. Reciclagem Energética	36
4. RECICLAGEM QUÍMICA E O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	39
5. PANORAMA DA RECICLAGEM QUÍMICA NO BRASIL	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do Lixo Global	15
Figura 2. Crescimento da Produção de Plástico.....	19
Figura 3. Os dados de produção e reciclagem do plástico desde 1950	20
Figura 4. Plásticos no Mundo	21
Figura 5. Esquema Logística Reversa	25
Figura 6. Fluxograma de Reciclagem Mecânica	29
Figura 6. Etapas do Processo de Reciclagem Mecânica.....	31
Figura 7. Fluxograma de Reciclagem Química	34
Figura 8. Fluxograma de Reciclagem Química	38
Figura 10. Fluxograma de Reciclagem Energética	40
Figura 11. Gaseificador de contracorrente	44
Figura 12. Efeito da temperatura gaseificação sobre os gases formados	45
Figura 13. Frações volumétricas dos gases produzidos em função da RE.....	51

LISTA DE PALAVRAS

WWF – World Wide Fund	10
Ibope – Instituto Brasileiro de Opinião Pública e Estatística	23
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais	23
BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	24
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.....	24
KWh – Kilo What Hora.....	36
H ₂ – Gás Hidrogenio	39
CO – Monóxido de Carbono	39
CO ₂ – Dióxido de Carbono	43
CH ₄ – Gás Metano	43
RE – Razão de Equivalência	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de Lixo.....	13
Tabela 2. Classificação dos tipos de Lixo	14
Tabela 3. Tipos de Polímeros Termofixos.....	17
Tabela 4. Tipos de Polímeros Termoplásticos.....	18
Tabela 5. Impactos da Reciclagem	23
Tabela 6. Instrumentos Utilizados na Reciclagem Mecânica.....	30
Tabela 7. Etapas do processo de gaseificação	35
Tabela 8. Vantagem da Gaseificação	40
Tabela 9. Desvantagens da Gaseificação.....	42
Tabela 10. Valores Experimentais de T, A e Ea.....	42
Tabela 11. Valores de Temperatura de Cada Etapa de Gaseificação	43
Tabela 12. Vantagens e Dificuldades dos diferentes Agentes de Gaseificação	44
Tabela 13. Vantagens e Dificuldades dos diferentes Agentes de Gaseificação	46
Tabela 14. Tipos de Reatores	46
Tabela 15. Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reatores	47
Tabela 16. Características desejáveis do gás de síntese para produção de metanol, hidrogênio e combustíveis	47
Tabela 17. Impurezas no <i>syngas</i> , fontes e mecanismos de controle	48
Tabela 18. Diferenças entre Reciclagem Mecânica e Química	52

INTRODUÇÃO

A grande maioria dos produtos e materiais utilizados pela humanidade não é totalmente consumida, restando uma significativa parcela de resíduos. Estes resíduos poderão seguir três destinos diferentes: a) serem lançados diretamente na natureza, poluindo o ambiente, ou, b) irem para um local de descarte seguro, como aterros sanitários e depósitos específicos; c) submeterem-se a um processo de reciclagem, com reprocessamento e devolução ao mercado dos produtos antes descartados (SOUZA, 2011).

Assim, tem-se a importância da reciclagem: remete-se ao fato de reduzir a necessidade de expansão de aterros e a demanda por recursos naturais, sendo essencial na adoção de um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos, ao lado da redução da geração de lixo na fonte, reutilização, incineração e disposição em aterros sanitários (CANELOI, 2010).

Ao analisar a reciclagem, deve-se considerar particularidades de processamento industrial e de disponibilidade de recursos a fim de apontá-la como a melhor alternativa, além da composição dos resíduos que são gerados, pois tais aspectos são determinantes e podem mudar consideravelmente de uma região para outra (SILVA; MOITA NETO, 2016).

O trabalho irá retratar prioritariamente acerca da reciclagem do plástico, um dos principais poluentes do planeta com cerca de 10 milhões de toneladas sendo despejadas anualmente nos oceanos segundo estudo da WWF (World Wide Fund) de 2018.

A composição desses resíduos que são gerados é determinante para a escolha de um tipo de reciclagem: A reciclagem mecânica, processo mais difundido no Brasil no qual os resíduos são reaproveitados, pode ser aplicada apenas para os plásticos denominados termoplásticos que não estejam contaminados com alimentos ou misturados com outros materiais (PESSOA, 2018). A reciclagem química e energética, nas quais há transformação química do lixo gerado, podem ser utilizadas para o tratamento dos resíduos restantes.

Dentre os possíveis processos da reciclagem química, a gaseificação será o método aprofundado neste trabalho, dada a sua grande relevância por converter resíduos em principalmente gases com diversas aplicações na indústria atual (ARENA, 2012).

Assim, o presente estudo visa compreender os desafios que a gaseificação, enquanto metodologia de reciclagem química, enfrenta no Brasil e como eles podem ser superados para que esse método seja uma alternativa viável junto a reciclagem mecânica, visando melhorar o tratamento de resíduos plásticos em nosso país.

Para tanto, a análise aqui empreendida irá:

- Caracterizar os processos de reciclagem no Brasil,
- Compreender os elementos que contribuem para o processo de reciclagem e, conseqüentemente, manutenção da sustentabilidade;
- Analisar, a partir dos processos existentes de reciclagem do plástico, as contribuições para o ambiente;
- Explorar, dentro do processo químico de reciclagem, a etapa de gaseificação;

Deste modo, este Trabalho de Conclusão de Curso pretende fazer uma revisão bibliográfica sobre a reciclagem mecânica e a química no Brasil, analisando criticamente alguns processos e as variáveis que os envolvem, além de discorrer sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais que cada tratamento possui.

1. SUSTENTABILIDADE E A PRODUÇÃO DE LIXO NO BRASIL

Ao longo das últimas décadas um novo pensamento vem ganhando espaço no cenário mundial, o da sustentabilidade, trata-se da promoção do desenvolvimento econômico e social, com uso consciente de recursos.

Nota-se que a interação do homem com o meio ambiente vem se transformando, buscando minimizar os impactos negativos da ação humana, com tomada de consciência frente ao manejo de recursos, sem gerar ônus para o ambiente, mas sim buscando tornar mais eficiente as formas de obter recursos, sem danificar o processo (ROOTS, 2009).

Surge, então, a preocupação com a sustentabilidade. De acordo com Cavalcanti (2011, p.220):

A sustentabilidade consiste em uma relação entre sistemas sociais, econômicos e ecológicos, orientados pelos requisitos de que a vida humana possa evoluir; de que as culturas possam se desenvolver; e de que os efeitos das atividades humanas permaneçam dentro dos limites que impeçam a destruição da biodiversidade e da complexidade do contexto ambiental.

A sustentabilidade consiste, então, em buscar meios de produção, distribuição e consumo dos recursos existentes de forma mais coesiva, economicamente eficaz e ecologicamente viável. A tomada de consciência é um dos processos mais complexos a se adquirir, compreender o seu papel frente a natureza, bem como as consequências trazidas pelos seus atos (BARBOSA, 2008).

Alguns encontros internacionais, ao longo do tempo, vem buscando essa tomada de consciência pela sustentabilidade, como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, a Rio 92 (AQUINO et al., 2015).

Há que se ressaltar que pesquisas na área ambiental vem sendo realizada com o intuito de melhorar o processo de desenvolvimento sustentável, corroborando com a compreensão do que já existe na natureza, do que pode ser transformado da melhor forma possível sem causar impactos e danos.

Nesta perspectiva, Neiman et al. (2014, p.31) afirmam que o meio ambiente se caracteriza por componentes físicos, químicos, biológicos e humanos em sua geometria e espacialidade, por processos, por dependências com relação à ação humana e por sua importância para nosso desenvolvimento.

Ao longo dos últimos anos foi sendo produzido muito material científico na busca por compreender a coleta de lixo e a diferenciação existente, como mecanismo de reciclagem.

Diante disto, faz-se necessário compreender a distinção entre lixo, rejeitos e resíduos. A VG Resíduos é uma startup criada em 2006, em Minas Gerais, na qual os clientes vendem e compram resíduos. Tal empresa delimita ser de extrema importância saber a diferença entre lixo, rejeito e resíduo proporciona uma gestão eficiente e de qualidade. O **lixo** é tudo aquilo que não se quer mais e joga fora. Já o **resíduo** é aquilo que não serve para você, mas para outros pode se tornar matéria-prima de um novo produto ou processo. O **rejeito** é um tipo específico de resíduo, onde foram esgotadas todas as possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem (VG RESÍDUOS, 2020).

Mesmo definido seu conceito, é necessário entender as diferentes classificações e variedades do lixo que produzimos hoje no mundo, informações contidas na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de Lixo

TIPOS DE LIXO	CARACTERÍSTICAS
Lixo orgânico	É composto por toda matéria orgânica descartada, como os restos de alimentos, borra de café, folhas e galhos de árvores, pelos de animais, cabelo humano, papel, madeira, tecidos etc.
Lixo inorgânico	É composto por matéria inorgânica como os metais e os materiais sintéticos, por exemplo.
Lixo úmido	É aquele composto por restos de comida, alimentos estragados, cascas e bagaços de vegetais etc.
Lixo seco	É composto pelos papéis, plásticos, metais, couros tratados, tecidos, vidros, madeiras, isopor, parafina, cerâmicas, porcelanas, espumas, cortiças e etc.

Fonte: Portal São Francisco (2020)

A Tabela 2 classifica os diferentes tipos de lixo produzidos na atualidade.

Tabela 2. Classificação dos tipos de Lixo

TIPOS DE LIXO PRODUZIDO	CARACTERÍSTICAS
Lixo Domiciliar	É formado pelos resíduos sólidos produzidos pelas atividades residenciais e apresenta em torno de 60% de composição orgânica e o restante formado por embalagens plásticas, latas, vidros, papéis etc.
Lixo Hospitalar	É proveniente dos hospitais, centros cirúrgicos, ambulatórios, postos médicos, consultórios médicos e odontológicos, clínicas, farmácias e laboratórios.
Lixo Comercial	Varia de acordo com a atividade desenvolvida no estabelecimento de origem. No caso de bares, restaurantes e hotéis predomina o lixo de origem orgânica enquanto os escritórios geram lixo onde predomina o papel.
Lixo Público	É aquele resultante das atividades de limpeza de vias e logradouros públicos e é composto por papéis, terra, folhas, etc.
Lixo Agrícola	É aquele composto pelos resíduos das atividades agropecuárias. Embalagens de adubos, defensivos agrícolas, restos de ração, restos de colheita, estrume, etc. Atenção especial deve ser dada as embalagens de defensivos agrícolas que merecem um tratamento adequado. O estrume produzido em atividades de criação intensiva também deve merecer o devido tratamento devido ao grande volume de produção.
Lixo Industrial	É aquele composto pelos resíduos sólidos produzidos nos processos industriais e suas características dependem diretamente do tipo de indústria e do tipo de processo utilizado. Porém nem sempre todo o resíduo produzido numa indústria é lixo. Ao contrário, podem ser subprodutos que servirão de matéria prima para outros processos industriais
Lixo Especial	Apresenta características especiais: merece atenção diferenciada no seu acondicionamento, transporte, manipulação e disposição. São alguns resíduos industriais, os gerados pela construção civil, os de serviços de saúde, os lixos radioativos, os de portos, aeroportos e terminais ferroviários e rodoviários.
Lixo Atômico	Produto resultante da queima do combustível nuclear, composto de urânio enriquecido com isótopo atômico 235. A elevada radioatividade constitui um grave perigo à saúde da população, por isso deve ser enterrado em local próprio, inacessível.
Lixo Radioativo	Resíduo tóxico e venenoso formado por substâncias radioativas resultantes do funcionamento de reatores nucleares. Como não há um lugar seguro para armazenar esse lixo radioativo, a alternativa recomendada pelos cientistas foi colocá-lo em tambores ou recipientes de concreto impermeáveis e a prova de radiação, e enterrados em terrenos estáveis, no subsolo.
Lixo Espacial	Lixo espacial é qualquer objeto lançado no espaço orbital da Terra que não tenha mais utilidade, tais como satélites desativados, fragmentos de satélite ou de foguetes, e até mesmo instrumentos e ferramentas perdidos por astronautas durante missões espaciais.
Lixo Eletrônico	Lixo eletrônico é todo e qualquer resíduo de equipamentos elétricos e eletrônicos, como celulares, tablets, computadores, lavadoras, geladeiras, etc.

Fonte: Portal São Francisco, 2020

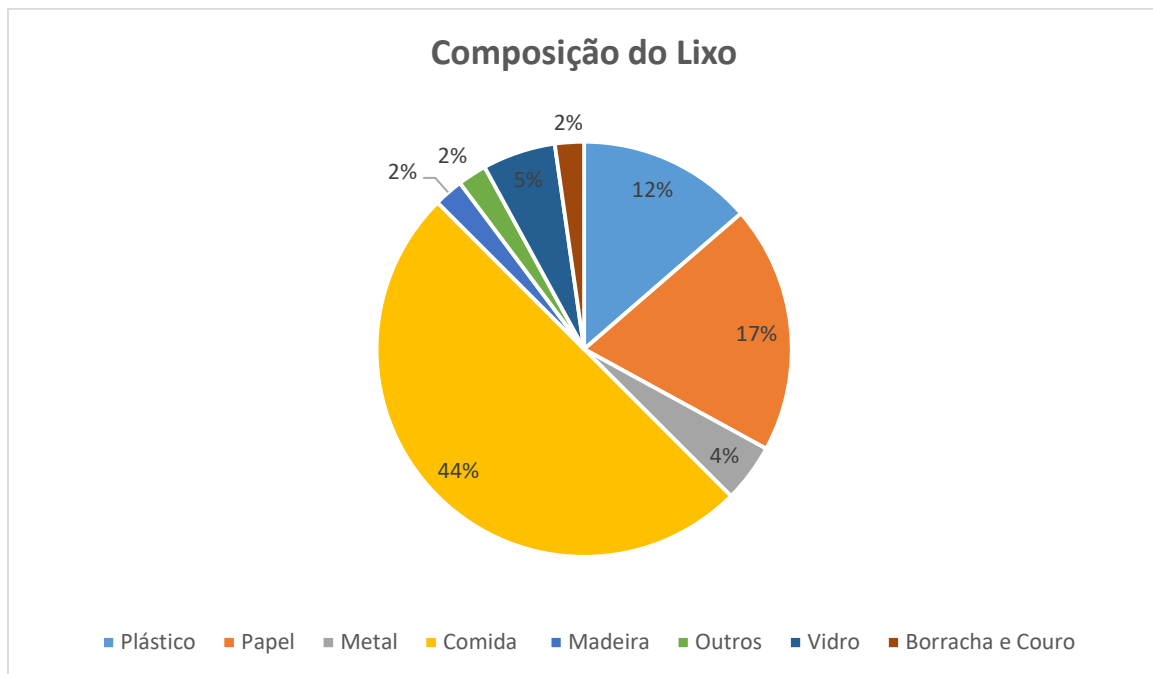
Diante da variedade de tipos de lixo existentes descrita acima e o grande crescimento da população mundial nos últimos anos, é natural imaginar que a produção de lixo por habitante é muito grande e tende a aumentar num futuro próximo. Segundo estudo feito pelo World Bank Group (2018), a produção de lixo no mundo chegou a 2,01 bilhões de tonelada em 2016, com projeção de aumento para 3,40 bilhões no ano de 2030.

As consequências dessa disposição inadequada do lixo no meio ambiente são diversas, incluindo: a proliferação de vetores de doenças (como ratos, baratas e micróbios), a contaminação de lençóis subterrâneos e do solo pelo chorume (líquido escuro, altamente tóxico,

formado na decomposição dos resíduos orgânicos do lixo), o entupimento das galerias pluviais urbanas (tubulações responsáveis por drenar, captar e transportar a água da chuva até os rios) causando problemas de saneamento, infraestrutura e enchentes, entre outros. Esta situação justifica a preocupação dos municípios com o tratamento e a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (HOLZER, 2012; BRK AMBIENTAL, 2018).

O plástico tem grande participação na composição desse lixo gerado. A Figura 1 mostra a representatividade de cada material no total de resíduos sólidos produzidos anualmente.

Figura 1 – Composição do Lixo Global



Fonte: Adaptado pelo próprio autor do World Bank Group (2018)

Dessa forma, a fim de repensar a elevada geração de lixo e minimizar os impactos negativos trazidos pela mesma, tem-se a necessidade de se discutir acerca da reciclagem do plástico como fator fundamental de sustentabilidade.

2. RESÍDUOS PLÁSTICOS

Plásticos são, geralmente, materiais sintéticos, derivados de petróleo e formados pela união de grandes cadeias moleculares chamadas polímeros (*poly* = muitos, *meros* = partes). As propriedades dos plásticos são definidas a partir do tamanho e da estrutura das moléculas desses polímeros (resinas) (PGIRP, 2009).

Os plásticos possuem propriedades específicas tais como leveza, resistência (há uma resistência ao impacto sem sofrer deformação), ataque a corrosão e a principal característica é a resistência a decomposição por microrganismos. Eles podem ser divididos em duas grandes categorias: os termoplásticos e os termofixos (MATTAR; VIANA, 2012).

De acordo com Propeq (2020) a caracterização das duas categorias acima compreende em:

- **Termofixos:** insolúveis e infusíveis, formam estruturas rígidas e duráveis, por terem ligações químicas cruzadas e, portanto, mais fortes. Não podem ser reciclados mecanicamente. Alguns exemplos são: silicone, resina epóxi, poliuretano (PU) e poliéster.
- **Termoplásticos:** correspondem a 80% dos plásticos consumidos, permitem fusão por aquecimento, podendo ser moldados repetidas vezes (e, portanto, reciclados mais facilmente), mas com perdas mecânicas a cada repetição do processo; são facilmente maleáveis, em geral utilizados para produção de filmes e embalagens. Exemplos: polipropileno (PP), o polietileno (como PET), o polimetil-metacrilato (ou acrílico) e o policloreto de vinila (PVC).

Diante do exposto acima, tem-se listado abaixo a diferenciação entre os tipos de polímeros termofixos e termoplásticos.

A Tabela 3 e 4, trazem a diferenciação de cada um dos tipos, abrangendo também exemplos de produtos e utilização de cada um dos tipos de polímeros existentes.

Tabela 3. Tipos de Polímeros Termofixos

POLÍMERO	PRODUTOS	UTILIZAÇÃO
Baquelite	Telefones, bolas de bilhas, câmeras fotográficas, etc.	Utilizada na produção de discos musicais, tomadas, interruptores, cabos de painéis, telefones, bolas de bilhar, câmeras fotográficas, revestimentos de móveis (para esta finalidade a baquelite é conhecida como fórmica), carapaças de eletrodomésticos, peças de automóveis e na produção de algumas ferramentas.
Poliuretano (PU)	Carrocerias refrigeradas, marmitas térmicas, cuias de chimarrão, esponjas de louça, travesseiros, almofadas, laminação de portas etc.	Utilizado na construção civil, transporte, móveis, eletrodomésticos etc.
Poliacetato de Etileno Vinil (EVA)	Solados, autopeças, chinelos, pneus, acessórios esportivos e náuticos, plásticos especiais e de engenharia, CDs, eletrodomésticos, corpos de computadores etc.	Matéria prima para brinquedos e utilitários como revestimento de óculos de natação. Por ser mais leve que a água, é usado como flutuador ou boia, além de aplicado em chinelos e sandálias.
Poliésteres	Além de roupas, filmes, filtros, tinta em pó, reforços para pneus, material isolante, enchimento de almofadas, telas de LED, acabamentos para instrumentos musicais	A principal é a produção de tecidos e malhas utilizados em camisas, calças, lençóis, cortinas, móveis e estofados
Resinas Fenólicas	Bola de sinuca, bancada de laboratório etc.,	São usadas em diversas aplicações industriais e por diferentes setores, como o automobilístico, elétrico, informático, aeroespacial e de construção civil.

Fonte: adaptado pelo autor a partir de AMBIENTE BRASIL, 2020

Os termoplásticos também são polímeros e suas delimitações estão descritas abaixo pela Tabela 4.

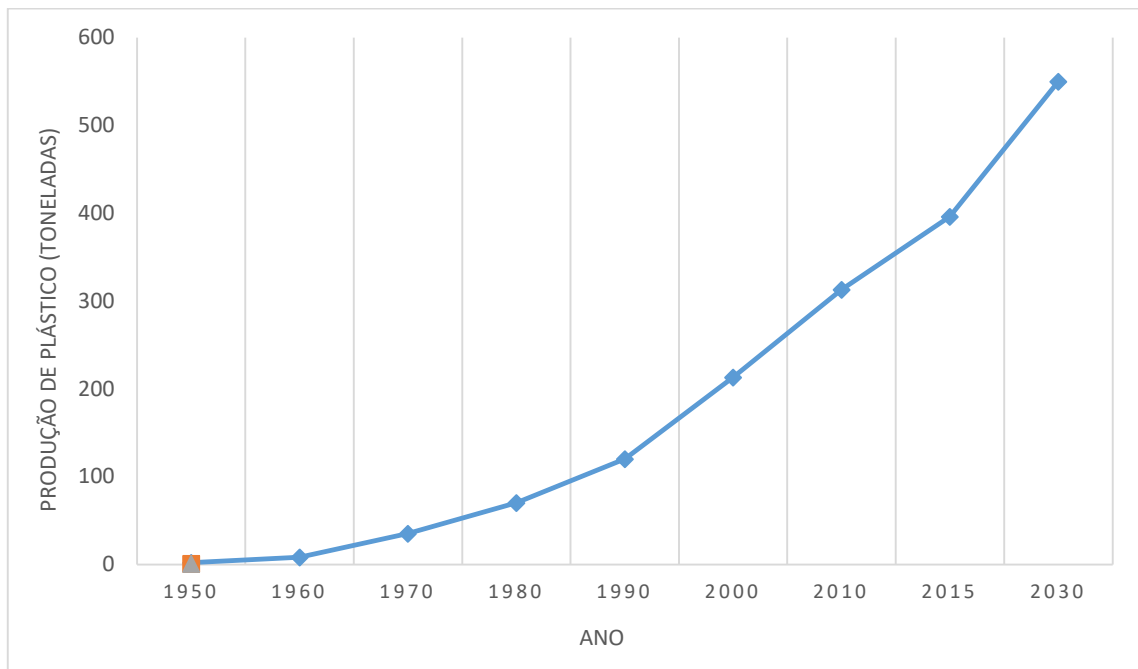
Tabela 4. Tipos de Polímeros Termoplásticos

POLÍMERO	PRODUTOS	UTILIZAÇÃO
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Sacolas para supermercados e lojas, filmes para embalar leite e outros alimentos, sacaria industrial, filmes para fraldas descartáveis, bolsa para soro medicinal, sacos de lixo, etc.	Uso mais comum é na fabricação de sacos de plástico. A embalagem dos leites longa vida é composta de camadas de papel, PEBD e alumínio. Também é amplamente utilizado na fabricação de diversos recipientes, tabuleiros, garrafas, componentes de computador, superfícies de trabalho, peças que necessitem de solda, equipamentos de laboratório, equipamento de parques infantis e película aderente;
Polietileno de alta densidade (PEAD)	Embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercados, garrafeiras, tampas, tambores para tintas, potes, utilidades domésticas, etc.	Geralmente utilizado pelas empresas fabricantes de engradados de bebidas, baldes, tambores, autopeças e demais produtos;
Poli (cloreto de vinila) (PVC)	Embalagens para água mineral, óleos comestíveis, maioneses, sucos. Perfis para janelas, tubulações de água e esgotos, mangueiras, embalagens para remédios, brinquedos, bolsas de sangue, material hospitalar, etc.	O mais utilizado em tubos, conexões e garrafas de água mineral e detergentes líquidos;
Poliestireno (PS)	Potes para iogurtes, sorvetes, doces, frascos, bandejas de supermercados, geladeiras (parte interna da porta), pratos, tampas, aparelhos de barbear descartáveis, brinquedos, etc.	Utilizado pelas fabricantes de eletrodomésticos e copos descartáveis;
Polipropileno (PP)	Filmes para embalagens e alimentos, embalagens industriais, cordas, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, caixas de bebidas, autopeças, fibras para tapetes e utilidades domésticas, potes, fraldas e seringas descartáveis, etc.	Usado normalmente para embalar massas, biscoitos, potes de margarina e manteiga, utilidades domésticas e embalagens de salgadinhos;
Poli (tereftalato de etileno) (PET)	Frascos e garrafas para uso alimentício/hospitalar, cosméticos, bandejas para micro-ondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis, etc.	Usado comumente para o envase de refrigerantes;
Poliamidas		Utilizado em roupas, sapatos, etc.

Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de Ambiente Brasil, 2020

Diante disto, tem-se que o uso recorrente deste material promove arranjos necessários na sustentabilidade ambiental.

A Figura 2 mostra o crescimento do uso do plástico na sociedade ao longo dos anos.

Figura 2. Crescimento da Produção de Plástico no Mundo

Fonte: Adaptado pelo próprio autor a partir de Fapesp, 2019

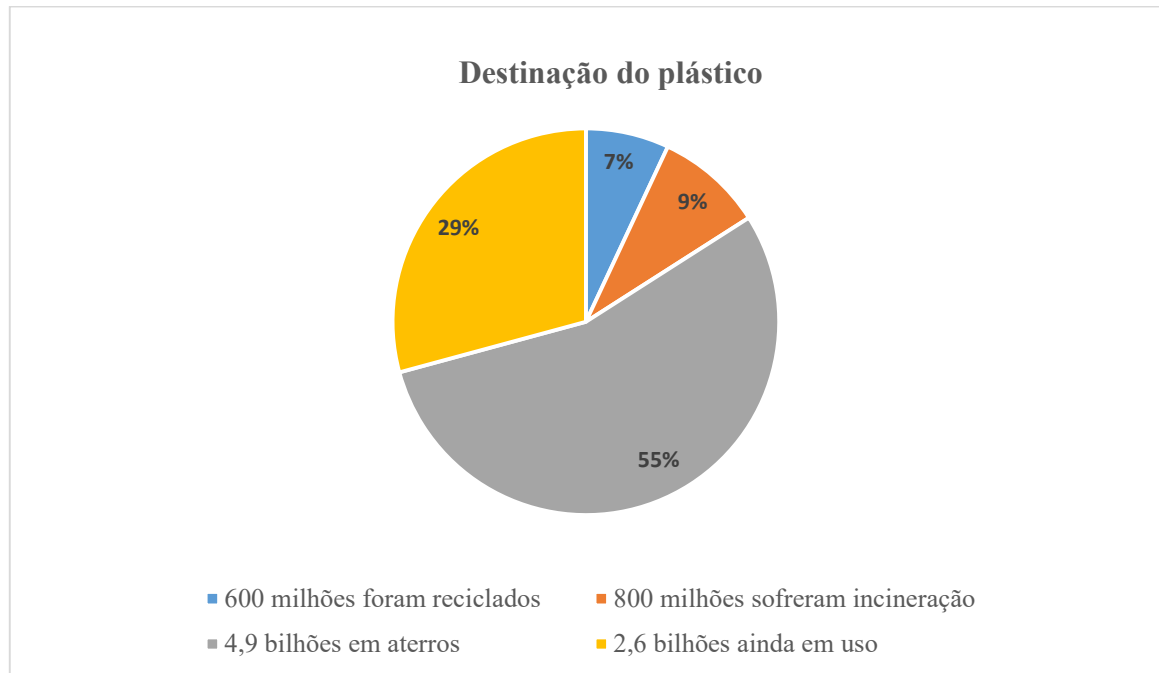
Apesar dos diversos benefícios que o plástico traz para a sociedade, os seus resíduos são prejudiciais. O grande volume dos materiais plásticos, a enorme quantidade de descarte pós-consumo e os impactos ambientais causados pela disposição incorreta dos resíduos, que não são biodegradáveis, são apenas alguns dos problemas a serem citados. Além disso, os plásticos podem causar danos à saúde dos seres humanos e dos animais, principalmente por causa dos aditivos e químicos utilizados na sua fabricação. Instrumentos regulatórios destinados a mitigar os efeitos dos plásticos na saúde humana e ambiental precisam seguir seu ciclo, desde a produção, o uso e o descarte (OLIVEIRA, 2012).

Diante disto, tem-se que o tempo de decomposição de cada material depende de uma série de fatores, tais como a natureza do material e o ambiente a que ele está exposto. Em geral, os plásticos levam de **200 a 600** anos para se decompor completamente na natureza (PROPEQ, 2020). Segundo Vasconcelos (2019, p.2):

Calcula-se que, a **cada ano**, mais de **8 milhões de toneladas de lixo produzidos** desse material cheguem aos oceanos, provocando prejuízos à vida marinha, à pesca e ao turismo. Grandes aglomerações de plástico flutuante estão presentes em todos os oceanos – são os chamados giros. O maior deles, a Grande Mancha de Lixo do Pacífico, forma-se na altura do Havaí e da Califórnia e se estende até o Japão.

Dados de 2017 apresentados pela Revista Fapesp demonstram que a produção e a reciclagem apresentam números discrepantes, quanto a sua quantidade e reutilização, informações contidas na Figura 3.

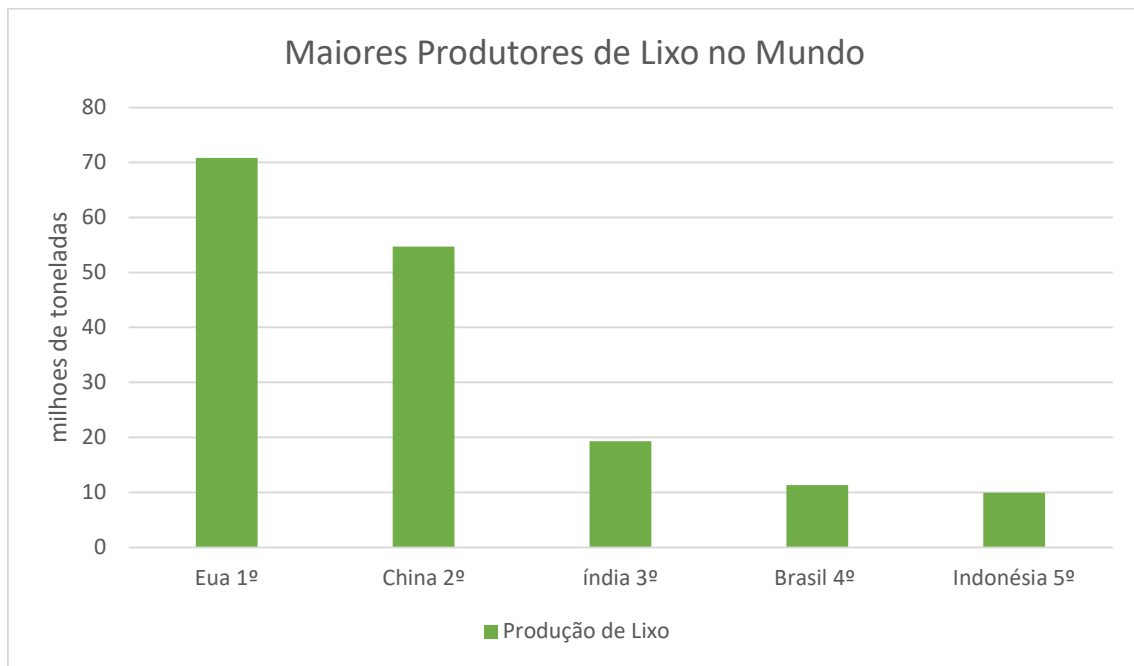
Figura 3. Os dados de produção e reciclagem do plástico desde 1950



Fonte: Adaptado pelo próprio autor a partir de Pesquisa Fapesp, 2019 e informações obtidas de *Production, Use, And Fate Of All Plastic Ever Made*, *Science Advances*, 2017

Vasconcelos (2019) delimita ainda que produtos plásticos de uso único, aqueles com vida útil efêmera, são a maior preocupação dos ambientalistas, por serem descartados imediatamente após sua utilização. Entre 35% e 40% da produção atual é composta por esse tipo de material, nos quais se incluem copos, sacolas, canudos, embalagens e talheres descartáveis. Os demais são produtos de longa duração, uma gama diversificada de itens que vai de celulares a peças automotivas, de tubulações para água e esgoto a equipamentos médicos e de informática.

A Figura 4 apresenta o panorama mundial do descarte plástico no mundo considerando os mais diferentes países.

Figura 4. Plásticos no Mundo

Fonte: Adaptado de Pesquisa Fapesp, 2019

Sendo assim, dada a elevada produção de plástico no mundo e a baixa porcentagem desse valor que é destinada à reciclagem, é necessário estudar uma maneira efetiva de tratar esses resíduos.

3. RECICLAGEM

Reciclar significa transformar objetos materiais usados em novos produtos para o consumo. Esta necessidade foi despertada pelos seres humanos, a partir do momento em que se verificaram os benefícios que este procedimento traz para o planeta Terra (FONSECA, 2013).

Como levantado anteriormente, o intenso avanço da urbanização e industrialização da sociedade nas últimas décadas provocou também um grande crescimento da geração de resíduos. Devido à preocupação ambiental relacionada ao tema, tem aumentado a mobilização coletiva em torno do gerenciamento desses resíduos e o uso intensivo dos recursos naturais (ANUÁRIO DA RECICLAGEM, 2019).

Nesse contexto, a reciclagem dos materiais é cada vez mais essencial para um desenvolvimento sustentável, pois além de reduzir o depósito de resíduos em aterro, diminui consequentemente a exploração de recursos naturais para produção de materiais virgens e contribui para a geração de renda ao longo da cadeia de logística reversa desses materiais, entre outros benefícios ambientais e sociais (ANUÁRIO DA RECICLAGEM 2019)

É importante destacar que a construção de aterros sanitários (técnica utilizada para disposição de resíduos sólidos urbanos no solo) minimiza os impactos ambientais e riscos à saúde pública. Porém, mesmo sendo o aterro sanitário melhor do que um “lixão”, se o local for inadequado, este pode comprometer as águas subterrâneas e superficiais (rios e lagos próximos), além de causar prejuízos e malefícios à qualidade do ar e de outros recursos naturais (ROSA et al., 2005).

O uso da reciclagem promove benefícios em diferentes aspectos. A Tabela 5 delimita com mais detalhes os impactos relacionados a reciclagem em diferentes segmentos sociais.

Tabela 5. Impactos da Reciclagem

Econômicos	Ambientais	Sociais
Altera a produção do mercado de materiais recicláveis, tornando-o proativo	Conservação de reservas naturais, com redução significativa de matérias-primas	Promove ocupação e renda para trabalhadores, o processo de reciclagem
Diminuição de valores da matéria-prima para o setor da indústria	Quantidade reduzida de energia na atividade industrial	Inserção dos catadores na sociedade
Redução de gastos das empresas voltados para o processo produtivo	Recuperação energética por meio da reciclagem	Crescimento do interesse social relacionado a questões ambientais
Redução de gastos públicos com a organização e a gestão de resíduos sólidos (limpeza, coleta, transporte e tratamento final)	Redução da contaminação ambiental em locais públicos	Probabilidade de alteração no padrão social de produção e consumo

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2009)

A reciclagem de plásticos, por exemplo, economiza 70% de energia que geralmente é utilizada desde a exploração da matéria-prima até a obtenção do produto final. (Ambiente Brasil, 2020).

Porém, apesar das inúmeras vantagens que o processo de reciclagem pode trazer para a sociedade e o meio ambiente, seu índice de execução ainda é muito baixo. Segundo pesquisa realizada pelo Ibope em 2018, 66% dos brasileiros afirmam saber pouco ou nada sobre coleta seletiva; 75% não separam os resíduos recicláveis que geram em casa e 39% não separam o lixo orgânico do inorgânico. Tal contexto explica os dados levantados por estudo feito pela Abrelpe, também em 2018: o Brasil recicla apenas 3% do lixo que produz anualmente.

Como consequência lógica, baixos índices de reciclagem promovem o aumento da geração de lixo e, conseqüentemente, de resíduos sólidos. Como citado anteriormente, tal contexto tem várias consequências negativas: 1) Custos cada vez mais altos para coleta e tratamento do lixo; 2) Dificuldade para encontrar áreas disponíveis para sua disposição final; 3) Grande desperdício de matérias-primas. Por isso, os resíduos deveriam ser integrados como matérias primas nos ciclos produtivos ou na natureza. Outras consequências do enorme volume de lixo gerado pelas sociedades modernas, quando o lixo é depositado em locais inadequados ou a coleta é deficitária, são: 1) Contaminação do solo, ar e água; 2) Proliferação de vetores transmissores de doenças; 3) Entupimento de redes de drenagem urbana; 4) Enchentes; 5) Degradação do ambiente e depreciação imobiliária e; 6) Doenças (IDEC, s/p).

Um fator a ser considerado na reciclagem, independentemente do tipo escolhido, remete-se a viabilidade financeira.

Muitos são os obstáculos econômicos existentes frente a reciclagem, como: custos logísticos elevados, ambiente fiscal inadequado, concorrência com materiais virgens, dificuldades ou falta de um financiamento adequado, não adoção de logística reversa, falta de recursos humanos capacitados, etc. (JORNAL CRUZEIRO DO SUL, 2019).

Segundo Plástico Virtual (2018), a indústria de reciclagem só consegue se manter ativa se existirem visibilidades financeiras, uma vez que os polímeros têm o menor valor agregado frente a toda a cadeia de reciclagem tornando-se discrepante quando comparados com outros materiais.

O financiamento citado acima é uma variável impactante no cenário da reciclagem. O BNDES possui uma política de incentivo à reciclagem de resíduos sólidos. De acordo com o banco, há uma linha de crédito que se chama – “Fundo Clima: Subprograma de Resíduos Sólidos”. Esta oferece financiamento para os seguintes segmentos: 1) Sistemas de coleta seletiva ou diferenciada de resíduos sólidos; 2) Sistemas de triagem de resíduos sólidos, automatizados ou semiautomatizados; 3) Tratamento de resíduos orgânicos, à exceção daqueles com geração de energia; e 4) Remediação de áreas previamente utilizadas para disposição inadequada de resíduos sólidos, inclusive para o aproveitamento econômico dos resíduos depositados (BNDES, 2020).

A linha de crédito se volta para – 1) Pessoas Jurídicas de Direito Privado com sede e administração no país; 2) Empresários individuais e; 3) Pessoas Jurídicas de Direito Público, à exceção da União (BNDES, 2020).

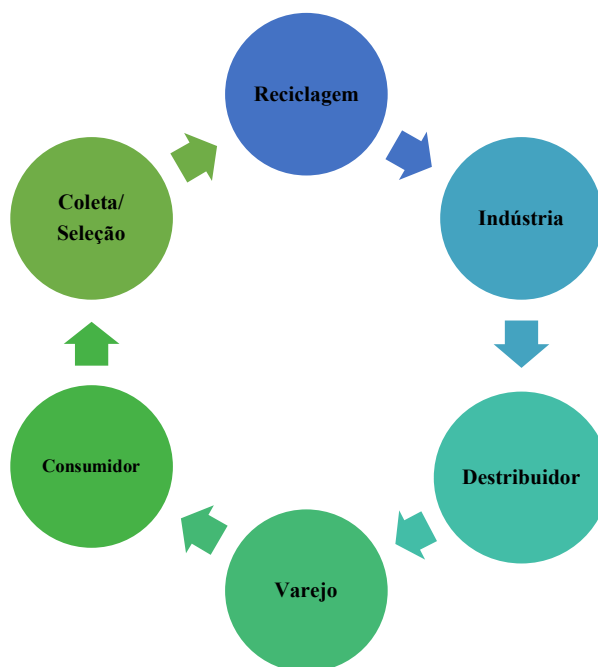
Nesta perspectiva, o IPEA (2016, p.1) informa que:

Na área de atuação de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos há uma linha para investimentos relacionados a resíduos sólidos, de acordo com banco, e poderia ser utilizada pelas cooperativas, não fossem algumas dificuldades. O valor mínimo de R\$ 20 milhões – as cooperativas, individualmente, precisam de apoio menor. Remuneração da instituição credenciada no caso do apoio indireto, pois por meio do apoio direto as cooperativas não se sentem pertencidas a pleitear o serviço; taxa de intermediação financeira; taxa de risco de crédito. A essência das cooperativas não tem relação com o porte, pois nem compõem micro, pequenas, médias ou grandes empresas. Com até 70% do valor total dos itens a serem financiados, prazo para pagamento e as garantias, as condições excluem das cooperativas a possibilidade de serem clientes em potencial. Portanto, justifica-se um programa que considere o financiamento específico para cooperativas da reciclagem.

Visto isto, é perceptível um aumento dos investimentos na área de sustentabilidade e reciclagem, sendo insuficientes, porém, para efetivar a reciclagem no país e tornar eficiente o tratamento de resíduos sólidos pós consumo.

Além do fator econômico, tem-se a não utilização da logística reversa, conjunto de ações que visa viabilizar a coleta de resíduos sólidos no setor empresarial para reaproveitar em seu ciclo ou definir outra destinação ambientalmente adequada, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010). A Figura 5 abaixo ilustra o processo de logística reversa.

Figura 5. Esquema Logística Reversa



Fonte: Adaptado de Texaco, 2018

Para Castanharo et al. (2009, p.51) existem fundamentos que fomentam a necessidade da utilização deste conceito no cenário da reciclagem. Como por exemplo os itens 1) **Legislação ambiental**: força as empresas a retornarem seus produtos e cuidar do tratamento necessário; 2) **Benefícios econômicos do uso de produtos que retornam ao processo de produção**: ao invés dos altos custos do correto descarte do lixo; 3) **A crescente conscientização ambiental dos consumidores**: seja qual forem os motivos citados que fazem uma empresa se preocupar com o retorno de seus produtos, isto leva a prática da logística reversa.

Dito isso, entende-se que a reciclagem consiste no resultado de uma série de atividades pelas quais materiais que se tornariam descartáveis, ou estão descartados, são desviados, coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de novos produtos, recursos naturais e trazer de volta ao ciclo produtivo o que é jogado fora. Este é, atualmente, a forma mais viável para a minimização dos problemas provenientes do lixo, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (ROSA et al., 2005).

3.1. Tipos de Reciclagem de Polímeros

Existem quatro principais classificações frente a reciclagem de polímeros: 1) primária, secundária, terciária e quaternária. E elas estão delimitadas abaixo, segundo Spinacé e De Paoli (2005, p.66):

Reciclagem primária: consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão em resíduos gerados no processo produtivo da própria empresa; por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento. **Reciclagem secundária:** conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, por exemplo, reciclagem de embalagens de PP para obtenção de sacos de lixo. **Reciclagem terciária:** processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. **Reciclagem quaternária:** processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

A primeira e segunda classificação consiste na reciclagem mecânica, enquanto a terceira volta-se para a reciclagem química e, por fim a quarta classificação remete a reciclagem energética.

3.2. Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é o processo de reciclagem mais utilizado no Brasil. Os resíduos são oriundos de resíduos urbanos (coleta seletiva, catadores nos lixões ou usinas de triagem), o que aumenta a complexidade em razão das diferentes contaminações presentes, englobando operações específicas de separação, pré-lavagem, lavagem, enxague, moagem, secagem, cuidados com efluentes, entre outras. Nesse tipo de reciclagem, não há alteração na estrutura química do material (WASSERMANN, 2006).

Esta é a mais usual e, talvez, a mais importante forma de reciclagem dos plásticos por possibilitar a imediata redução de volume e da massa do descarte. Consiste na transformação dos descartes plásticos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos para a produção de novos produtos, entre os quais sacos de lixo, solados, pisos, conduítes, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não-alimentícias etc. (COELHO, 2005).

O processo inicial da reciclagem mecânica parte da triagem manual. Trata-se da separação realizada pelos sujeitos em suas casas, ou os catadores de lixo. Como citado anteriormente, essa etapa da reciclagem muitas vezes não é realizada com eficiência.

A seguir serão descritas cada uma das etapas desse tipo de reciclagem.

- **Coleta** – O processo de reciclagem mecânica se inicia com a coleta (caminhão de coleta de lixo) – nesta etapa o homem tem papel fundamental, devendo separar seus lixos por agrupamento e classificações [plástico; vidro; orgânico; papel];
- **Separação** – Com a coleta realizada, tem-se a separação na estação de reciclagem, com separação adequado dos materiais que podem ser reciclados e os que não podem pelo modelo mecânico de reciclagem, separa-se por tipo de material e cor;
- **Empacotamento** – Nesta etapa o plástico passa por uma prensa ou moagem, para se condensar;
- **Lavagem** – Na lavagem ocorre também uma separação, os fragmentos, comumente chamados de *flakes*, são lavados com água e a separação é feita pela diferença de densidade, ou seja, materiais mais densos afundam e os menos densos ficam na superfície da água;
- **Secagem** – Na secagem, os *flakes* separados são secos em grandes secadores com circulação de ar quente;
- **Extrusão** - os *flakes* são alimentados em uma máquina extrusora, onde são fundidos por aquecimento e levados por uma rosca sem fim a uma matriz, formando os filamentos contínuos, comumente chamados de “espaguete”, que são resfriados em uma banheira com água a temperatura ambiente e cortados em uma granuladora, formando os grânulos de material plástico reciclado, que são embalados.
- **Grânulos** – Nesta etapa, os grânulos de materiais embalados acima são transformados em matéria-prima;

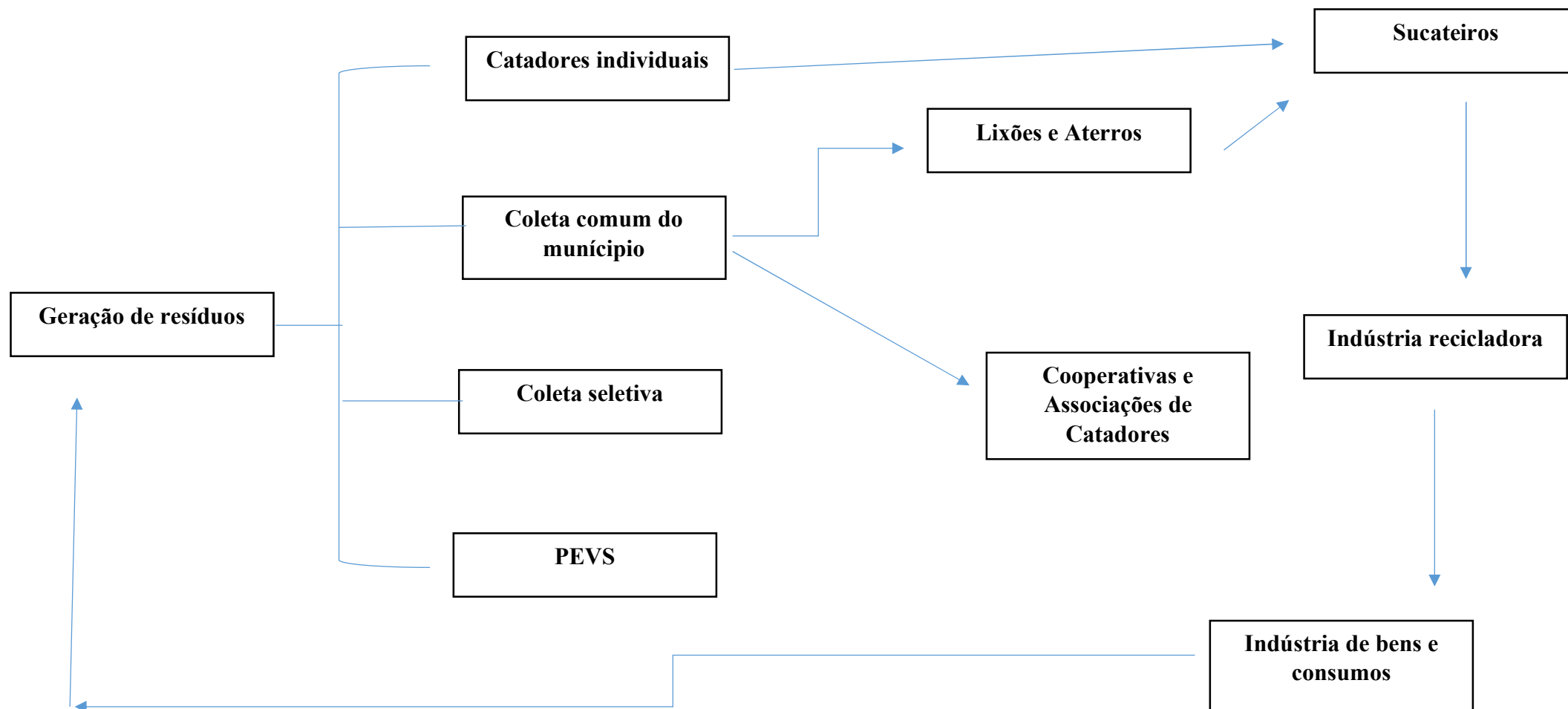
- **Matéria-prima** – São direcionadas a diferentes indústrias que promovem novos materiais a partir desta matéria-prima (BLUEVISION; 2020, PLÁSTICO VIRTUAL, 2017).

Além de ser relativamente simples, a cadeia em questão é vantajosa pela geração de empregos proporcionada, principalmente nas fases de coleta e separação, realizadas por cooperativas de reciclagem geralmente (RODRIGUES, 2015).

Essas mesmas etapas, inclusive, são umas das mais importantes e desafiadoras desse tipo de reciclagem. De acordo com relatório de 2018 da Cempre, apenas 17% da população tem acesso a coleta seletiva, dado que, se somado a baixa separação dos resíduos citada anteriormente, explicam a taxa de reciclagem irrisória em nosso país.

Partindo do exposto acima, tem-se o fluxograma do processo de reciclagem mecânica demonstrado na Figura 6.

Figura 6. Fluxograma de Reciclagem Mecânica



Fonte: Anuário de Reciclagem adaptado pelo próprio autor (2019)

Os instrumentos principais utilizados no processo de reciclagem mecânica estão descritos na Tabela abaixo.

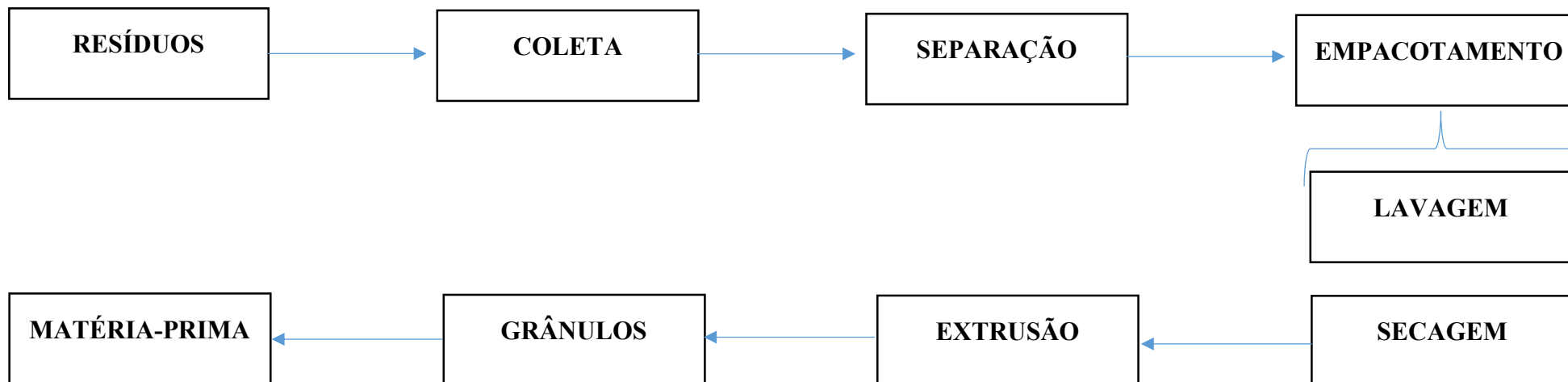
Tabela 6. Instrumentos Utilizados na Reciclagem Mecânica

INSTRUMENTOS	DESCRIÇÃO
Moinho	Tem a função de moer ou triturar o material, caso esse possua grandes dimensões e maior dureza, impossível de ser moído somente pelo equipamento de lavagem. Sua produtividade pode ser medida através da potência de seu motor. Sendo assim, a produção é de 100 kg/h para um motor com potência equivalente a 20 HP, 150 kg/h para motores com potência de 30 HP e produção de 300 kg/h para motores com potência de 50 HP;
Lavadora	Lavadora: retira todas as impurezas do material utilizando água como principal elemento de limpeza. Um motor com 20 HP é capaz de atingir uma produção de 200 kg/h;
Secadora	Utilizado para retirar o excesso de água do material já lavado ou limpo. Hoje, existem equipamentos secadores já embutidos ou acoplados às máquinas lavadoras. Sendo assim, atinge-se a mesma produção por hora da lavadora, ou seja, 200 kg/h com um motor de 20 HP;
Aglutinador	Constituído com facas que trabalham em alta rotação, possibilita a complementação de secagem do material, além de aglomerar o material leve, reduzindo o seu volume. Aumenta a densidade do material, melhorando o fluxo do material no funil alimentador da extrusora e conseqüentemente na alimentação da rosca. A aglutinação e secagem ocorrem através do atrito das facas no material e por atrito entre os materiais. Consegue-se atingir uma produção de 100 kg/h com um motor de 30 HP e até uma produção de 200 kg/h com um motor de 50HP
Extrusora	Conforma o material plástico. Durante a reciclagem de material impuro, a mesma deve possuir uma tela para reter essas impurezas. O material plástico sai em forma de espaguete, caso a extrusora não possua corte na saída. A produtividade das extrusoras é medida de acordo com o diâmetro da rosca juntamente com a potência do motor existente na mesma. Sendo assim, para uma extrusora com diâmetro de rosca de 120 mm e motor de 60 HP, é possível alcançar uma produção de até 220 kg/h;
Picotador	Granula os espaguetes de material, em tamanho próximo aos 3 mm, ideal para a aplicabilidade deste material pelas indústrias de transformação. Geralmente, está acoplado a extrusora.

Fonte: adaptador pelo próprio autor a partir de Castanharo et al., 2009

Diante dos elementos listados acima, tem-se a Figura 7, que delimita o processo em um fluxograma.

Figura 7. Etapas do Processo de Reciclagem Mecânica



Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de Bluevision, 2020

Diante da Figura 7, compreende-se os diferentes elementos que compõem o processo de reciclagem mecânica. Neste contexto, a partir das etapas listadas acima, pode-se citar as dificuldades encontradas no processo deste tipo de reciclagem, que segundo Trindade (2015, p.57) incluem:

- Aumento do preço do material reciclado, o que tem causado queda na competitividade com as resinas virgens e pode ser visto como um impedimento no avanço da reciclagem mecânica de plásticos.
- Devido as variações térmicas e mecânicas que o material sofre durante o processo, há desconfiança da indústria e do consumidor final em relação ao plástico reciclado no que se refere a sua composição;
- Sujeira e má separação dos resíduos no início do processo, prejudicando o produto final;
- Altos custos de energia elétrica na operação dos equipamentos;
- Falta de apoio do governo por meio de incentivos à indústria da reciclagem;

Somado a isto, tem-se o controle de qualidade da matéria-prima produzida a partir da reciclagem realizada. Tal premissa caracteriza-se como etapa indispensável para o desenvolvimento de pesquisas acerca da reciclagem e no modo de verificação das principais características do material (suas propriedades), bem como na contribuição significativa e direta da conscientização da população quanto ao uso de produtos reciclados. (MÄHLMANN; LAWISCH; KIPPER, 2004).

Por fim, a composição do resíduo que será tratado é outro aspecto relevante nesse processo. Cargas que contém mistura de plásticos e/ou são contaminadas com alimentos ou outras substâncias não podem ser tratadas mecanicamente, exigindo métodos alternativos de tratamento. (MONTEIRO, 2018)

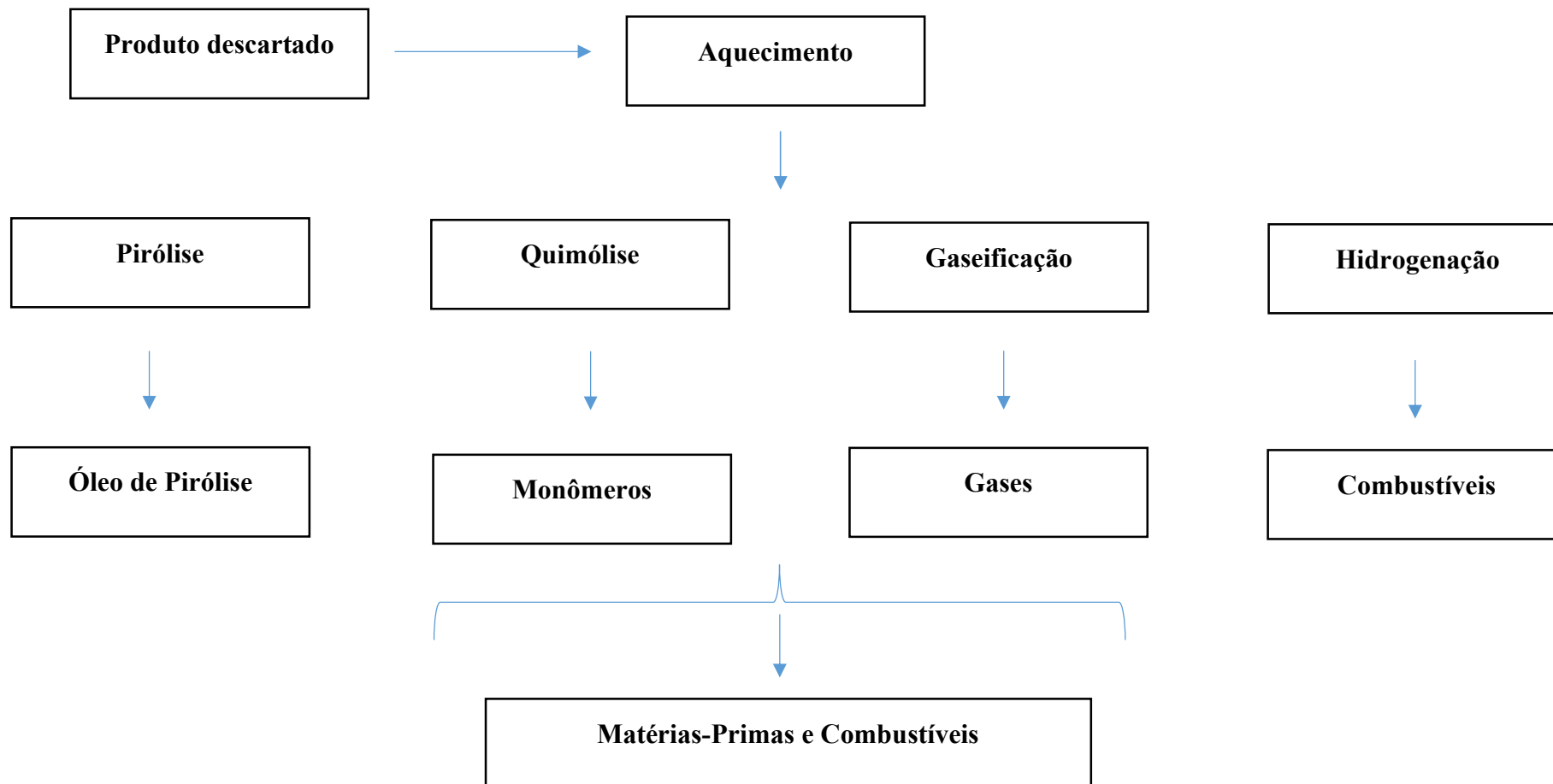
Portanto, apesar da reciclagem mecânica ainda ser o mecanismo mais disseminada no Brasil para transformar os resíduos (pós-industriais ou pós-consumo) em novos produtos, ela tem suas limitações e não permite o tratamento de todos os tipos de materiais, o que mostra a necessidade do estudo de alternativas distintas de reciclagem.

3.3. Reciclagem Química

A baixa biodegradabilidade dos plásticos quando aquecida promove o fortalecimento e, conseqüentemente, o reaproveitamento desses materiais por meio de técnicas de reciclagem. Acredita-se que o processo de reciclagem química vem quebrando as medidas restritivas das técnicas de reprocessamento e da reciclagem mecânica, na qual ambas consistem em processos limitados a resíduos limpos e homogêneos. No entanto, muitos questionamentos ainda se fazem presente acerca de aplicações e características desta técnica, no que concerne as particularidades das amostras residuais locais. Este processo pode se alterar de acordo com o tipo de técnica adotada, com as condições de operação, com a carga residual polimérica, dentre outras (MONTEIRO, 2018).

Diante disto, tem-se que a reciclagem química é o termo dado a avançados processos que convertem os materiais plásticos em moléculas menores adequados para a produção de novos produtos petroquímicos e polímeros, a tecnologia por trás do processo é a despolimerização. Obtém-se novamente os monômeros que o originaram o polímero. São, porém, processos complexos e de alto custo, muitas vezes não justificáveis para obtenção de produtos muito baratos como a maioria dos polímeros (MANTOVANI, 2015).

Este tipo de reciclagem reprocessa o plástico, transforma-o em petroquímico básico que pode ser utilizado como matéria prima em refinarias, centros petroquímicos, etc. O objetivo consiste em recuperar os componentes do plástico de forma individual, a fim de reutilizar em diferentes produtos, até mesmo na formulação de um novo plástico (RICCHINI, 2020). A Figura 8 apresenta o processo de reciclagem química.

Figura 8. Fluxograma de Reciclagem Química

Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de BLUEVISION, 2020

Diante disto, tem-se os processos que compõem a reciclagem química são: 1) Hidrogenação, 2) Gaseificação; 3) Pirólise e; 4) Quimólise, estes serão descritos abaixo na Tabela 7.

Tabela 7. Elementos da Reciclagem Química

ETAPAS	DESCRIÇÃO
Hidrogenação	Acontece quando são usados hidrogênio e calor para quebrar os polímeros. O resultado desse processo permite que a matéria-prima resgatada seja usada em refinarias
Gaseificação	Consiste na geração de gases de síntese a partir do aquecimento dos plásticos com ar ou oxigênio
Pirólise	Sem oxigênio, o calor quebra as moléculas dos plásticos capazes de gerar hidrocarbonetos usados em refinarias
Quimólise	São usadas substâncias como metano, água e glicol para a quebra dos polímeros

Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de Fragmaq, 2017

Diante do exposto acima, Pêsoa (2018) afirma que o processo de hidrogenação é uma possibilidade coerente da quebra dos elementos do plástico, uma vez que possibilita a formação de produtos saturados, sem que haja a presença de partículas líquidas, favorecendo o uso sem a necessidade de mais tratamentos. Outra vantagem desse método remete-se a tiragem de átomos de cloro, nitrogênio e enxofre do resíduo, quase sempre presentes nos polímeros. Um dos desafios é o alto custo ainda associado ao processo, uma vez que o hidrogênio necessita de ambientes com alta pressão, refletindo diretamente no valor dos produtos. Como foi citado, a pirólise também é um tipo de processo de reciclagem química. Pêsoa (2018) indica dois tipos de pirólise: a despolimerização (que ocorre a baixas temperaturas) e a degradação térmica (que utiliza altas temperaturas), sendo o primeiro mais coerente por não degradar o material.

O tratamento dos resíduos através da degradação térmica gera um produto de 3 fases: gasosa (composta por H₂, CO, CO₂, entre outros), sólida (cinzas e carbono que podem ser aproveitados) e líquida (hidrocarbonetos aplicáveis na obtenção de energia). (LORA, et al., 2012).

Por fim, tem-se a quimólise. Segundo o Manual do Programa Pellet Zero (2018, p.28) este processo está presente no:

Processo reciclagem química em que os polímeros são despolimerizados na presença de glicol, metano e água até retornarem às moléculas dos petroquímicos que os originaram. O calor é normalmente empregado, porém em níveis pouco acima da temperatura de fusão do polímero. Também chamada de solvólise,

A grande desvantagem desse processo é a restrição de sua aplicação para polímeros formados por policondensação, que representa apenas 15% dos plásticos gerados. O politereftalato de etileno (PET) é o principal plástico utilizado como carga nesse processo, e exige altos custos para a limpeza do ácido tereftálico produzido (TPA), o que evidencia outro desafio para este método. (MONTEIRO, 2018).

Quanto a gaseificação, Oliveira e Cruz (2016, p.17) a delimitam como um processo no qual os resíduos sólidos são convertidos em um gás de síntese através de diversas reações químicas. Este método será estudado mais a fundo futuramente no trabalho.

Diante disto, compreende-se as diferenças existentes em entre os processos que podem ser empregados na reciclagem química. Como dito anteriormente, mais abaixo será realizada uma seção com foco na gaseificação, a fim de explorar as diferentes variáveis que interferem neste processo.

3.4. Reciclagem Energética

A reciclagem energética distingue-se da incineração devido a utilização de resíduos plásticos como combustível na produção de energia elétrica. Já a simples incineração não reaproveita a energia dos materiais. A energia contida em 1 kg de plástico é equivalente à contida em 1 kg de óleo combustível. Além da economia e da recuperação de energia, com a reciclagem ocorre ainda uma redução de 70 a 90% da massa do material, restando apenas um resíduo inerte esterilizado (RICCHINI, 2020).

No caso dos plásticos, são produzidos cerca de 650 quilowatt-hora (kWh) de energia por tonelada de resíduo. Isso acontece porque o movimento giratório produzido pelo eixo da bobina altera o fluxo do campo magnético dentro do gerador e, com a alternância no fluxo do campo magnético, é produzida a energia elétrica (ECYCLE, 2018).

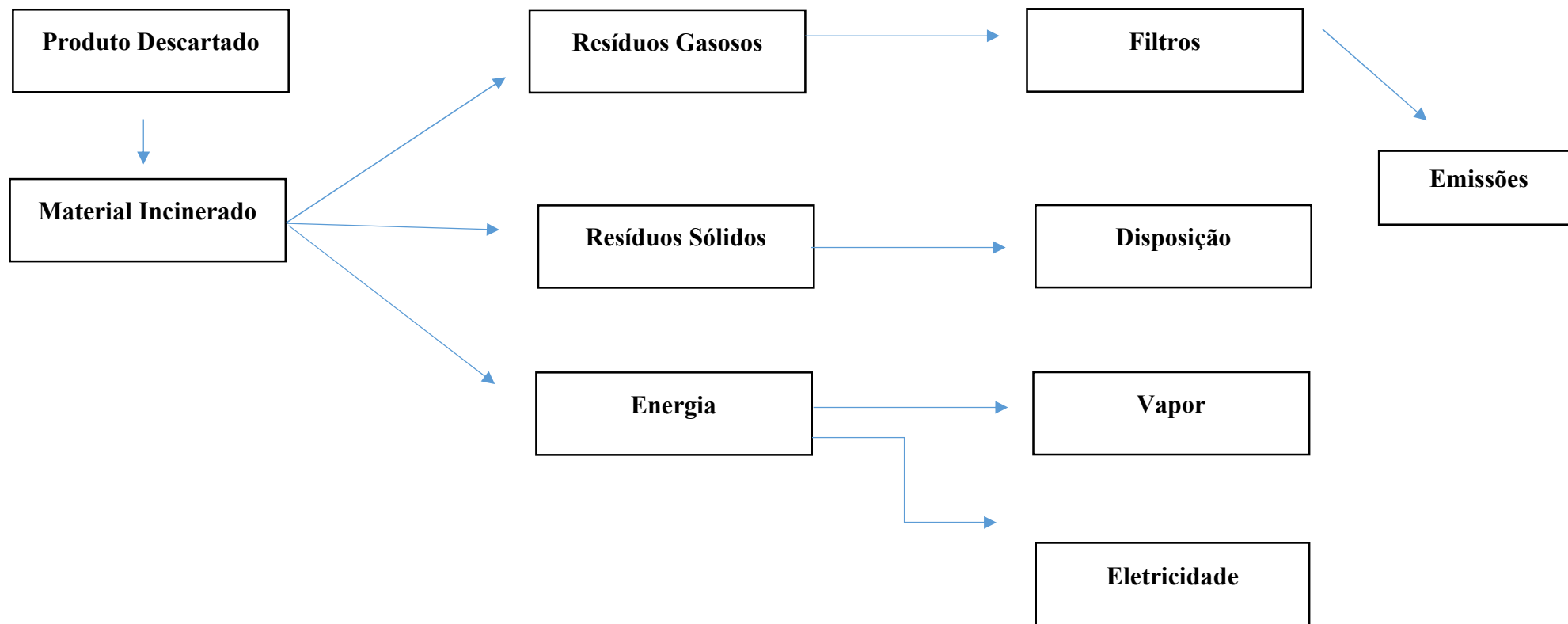
De acordo com Mantovani:

A reciclagem energética consiste na queima dos polímeros para recuperar o poder calorífico desses materiais. Além do inconveniente da poluição gerada com a queima desses materiais, outros processos que geram produtos de maior valor agregado podem ser mais lucrativos (MANTOVANI, 2015, p.25).

A reciclagem energética é muito importante pois além de criar novas matrizes energéticas para uma determinada localidade, amplia as possibilidades de tratamento do lixo urbano (UNIVASF SUSTENTÁVEL, 2018).

A Figura 10 apresenta o processo exercido neste processo de reciclagem.

Figura 9. Fluxograma de Reciclagem Energética



Fonte: adaptado pelo próprio autor de CHRESTANI, 2020.

4. RECICLAGEM QUÍMICA E O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Como apontado anteriormente, dependendo do tipo de plásticos a ser reciclado, da composição e da massa molar dos produtos desejados, muitos são os métodos de reciclagem química que podem ser implementados (MONTEIRO, 2018).

Compreendendo a abrangência da reciclagem química junto aos polímeros, tem-se a ênfase deste trabalho no processo de gaseificação.

A gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que tenha carbono em sua composição) em um produto gasoso combustível (gás de síntese). Os sistemas de gaseificação operam de forma a limitar a oxidação completa do hidrogênio para água, e do monóxido de carbono para dióxido de carbono (PUC RIO, 1986).

Nesta perspectiva, Arena (2012) delimita que gaseificação é um processo de transformação de resíduos sólidos em gases combustíveis, como sugere o próprio nome, o qual ocorre por meio de reações de formação de gás, no qual parte do combustível é queimado para o fornecimento de calor suficiente para gaseificar o restante dos resíduos sólidos. Segundo Lora (2012) e Arena (2012), os principais produtos obtidos nesse processo são:

- CO, H₂ e CH₄ (oriundos da oxidação incompleta);
- CO₂ e H₂O (produtos típicos da combustão);
- Cinzas obtidas no fundo do reator como resultado da combustão que podem ser utilizadas na construção de estradas
- H₂S, HCl, COS, NH₃, HCN, alcatrão (substâncias poluentes)

A mistura do gás hidrogênio (H₂) e do monóxido de carbono (CO) é chamada de gás de síntese, principal produto obtido do processo de gaseificação. Os principais fatores que afetam a qualidade do gás produzido são: tipos de reator, parâmetros de operação e agentes de gaseificação, que serão analisados no decorrer do trabalho, assim como suas principais aplicações na indústria.

O processo de gaseificação compreende quatro etapas principais: 1) Secagem, 2) Pirólise, 3) Combustão; 4) Redução. Cada uma ocorre em zonas relativamente separadas dentro do reator. A Tabela 8 delimita os pressupostos que envolvem cada um dos elementos do processo.

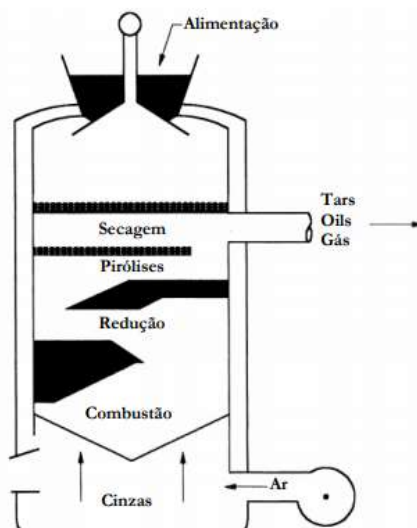
Tabela 8. Etapas do processo de gaseificação

ETAPA	DESCRIÇÃO
Secagem	Onde ocorre a redução do conteúdo de umidade da matéria-prima
Pirólise	Onde ocorre a decomposição térmica irreversível da matéria-prima em presença de um agente gaseificante, geralmente ar/oxigênio e vapor.
Combustão	Onde os hidrocarbonetos presentes na matéria-prima são oxidados para formar água, CO e CO ₂ . Valores de temperaturas encontrados para essa etapa, em gaseificadores típicos, ficam na faixa de 700 a 1500 °C.
Redução	Onde são formados gases combustíveis como CH ₄ , H ₂ e também CO, através de reações como a reação de metanação, reação de deslocamento da água, reação de reforma a vapor e reação de Boudouard.

Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de De La Rocha, 2016

A figura 10 abaixo ilustra o funcionamento de um gaseificador de contracorrente *updraft* e as diferentes etapas do processo de gaseificação.

Figura 10. Gaseificador de contracorrente



Fonte: Rezende, 2013

O resíduo sólido entra pela parte de cima do reator enquanto o agente de gaseificação (ar no caso ilustrado) entra por baixo, ocorrendo diversas reações que estão detalhadas a seguir (LORA et al.,2012):

1. Pirólise

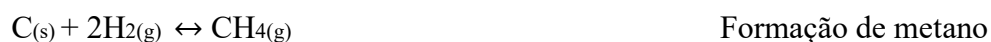
Resíduos Plásticos + Calor → Coque + Gases + Alcatrão + Condensáveis

2. Oxidação do carbono

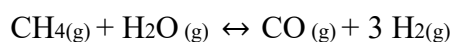
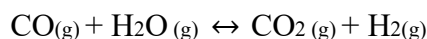


3. Gaseificação

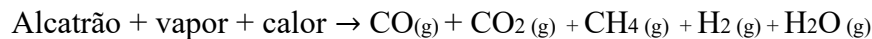
- Reações heterogêneas



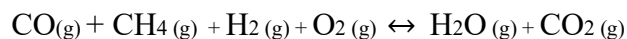
- Reações homogêneas



4. Craqueamento do alcatrão



5. Oxidação parcial dos produtos da pirólise



Diante do exposto acima, lista-se algumas vantagens da gaseificação que estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9. Vantagem da Gaseificação

VANTAGENS	<p>Diminuição da quantidade de resíduos em aterros sanitários;</p> <p>Produção de um gás de síntese, com variações de aplicabilidade, como na geração de energia elétrica e produção de combustíveis líquidos;</p> <p>Gás de síntese produzido pode ser utilizado como gás combustível em caldeiras e turbinas</p> <p>Processo de gaseificação possibilita combinar condições de operação (temperatura e razão equivalente, por exemplo)</p> <p>A energia gerada com o gás de síntese produzido é capaz de alimentar uma planta de pequena escala (em geral, menor do que 120 kton/ano), sendo que a combustão direta convencional não é conveniente nesse caso porque a limpeza do gás de síntese é pouco relevante</p> <p>Plantas de gaseificação são geralmente modulares e fáceis de construir;</p> <p>Comparada com a pirólise, a técnica de gaseificação apresenta limitação na emissão de dioxinas, furanos e <i>NOx</i> por conta de atmosfera redutora, desde que o tempo de residência e a temperatura sejam adequadamente controlados;</p> <p>Com exceção das cinzas e de alguns compostos voláteis, a maioria dos inertes é coletada no fundo do reator, com os metais ficando principalmente na forma não oxidada.</p>
------------------	---

Fonte: próprio autor adaptador a partir de Monteiro, 2018

A Tabela 10 delimita as desvantagens do processo de gaseificação.

Tabela 10. Desvantagens da Gaseificação

DESVANTAGENS	<p>O uso do ar diminui o poder calorífico do gás produzido, decorrente do nitrogênio;</p> <p>O uso do oxigênio necessita investimento na separação do ar, o que demanda novos investimentos, com altos custos de produção de oxigênio;</p> <p>Muitos parâmetros interferem no processo de gaseificação (temperatura do processo, tempo de residência, propriedades físicas e composição de resíduo, etc.);</p> <p>O gás de síntese produzido é tóxico e explosivo, aumentando as exigências de segurança e controle da planta;</p> <p>Os custos para tratamento, condicionamento e limpeza do gás de síntese são muito elevados;</p> <p>A produção de poluentes depende de como o gás de síntese é processado após o gaseificador: se ele for eventualmente oxidado, dioxinas, furanos e <i>NOx</i> ainda poderão ser produzidos</p>
---------------------	--

Fonte: próprio autor adaptador a partir de Monteiro, 2018

Com isto, delimita-se alguns efeitos que podem vir a interferir no processo de gaseificação e na qualidade do gás de síntese produzido descritos abaixo:

- Matéria-Prima

Segundo Lora (2012), características como a granulometria e a umidade da matéria-prima são determinantes no processo de gaseificação, visto que podem afetar a formação

de espaço entre as partículas do leito e alterar a temperatura no interior do reator, respectivamente.

Além disso, um aumento da umidade no material que será tratado pode favorecer a produção de dióxido de carbono e diminuir a geração do monóxido, situação indesejável no processo. (CASTANHEIRA, 2017, p. 9)

Um estudo feito por Brems (2013) utilizando plásticos como matéria-prima concluiu que é possível obter um bom grau de conversão na produção do gás de síntese com um tempo de residência relativamente baixo a partir dos parâmetros determinados na tabela 11.

Tabela 11. Valores Experimentais de T, A e Ea.

Resíduo Plástico	T(K)	A(s ⁻¹)	Ea (kJ/mol)
Poliestireno (PS)	953	2,94x10 ⁻¹⁴)	212
Politerftalato de etileno (PET)	968	2,94 x10 ⁻¹⁶	238
Polietileno (PE)	1008	5,12 x10 ⁻¹⁵	289
Polipropileno (PP)	1018	1,99 x10 ⁻¹³	187

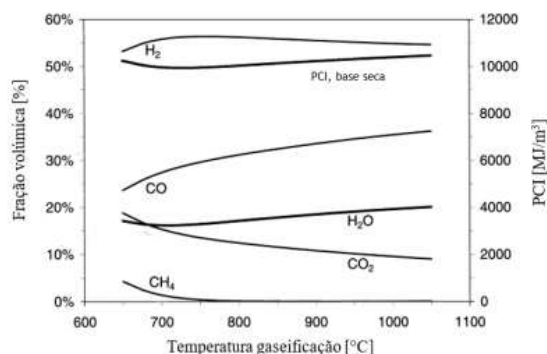
Fonte: Brems (2013)

Sendo (T) a temperatura ótima para o polímero em questão, enquanto que (A) remete-se a uma constante cinética da equação de *Arrhenius* e, (Ea) volta-se para a energia de ativação de cada um dos materiais, determina-se a constante da taxa de reação, conversão e tempo de residência para qualquer temperatura a partir da equação de *Arrhenius*.

- Perfil de Temperatura do Reator

Durante todo o processo é muito importante a monitoração da temperatura, pois ela é determinante na transformação completa do carbono presente no resíduo plástico. Caso isso não ocorra e o mesmo se acumule em cinzas, a geração de energia será menor, resultado indesejável (LORA et al., 2012).

A figura 11 abaixo mostra como o aumento da temperatura pode favorecer a formação de monóxido de carbono e vapor de água, enquanto diminui a quantidade de CO₂ e CH₄ formados.

Figura 11. Efeito da temperatura gaseificação sobre os gases formados

Fonte: Castanheira, 2017. Adaptado de Schuster et al. (2001)

É importante reiterar que cada uma das etapas da gaseificação ocorre a uma temperatura diferente, e por isso trata-se de um perfil de temperatura. A Tabela abaixo delimita os valores, em graus célsius, de cada etapa.

Tabela 12. Valores de Temperatura de Cada Etapa de Gaseificação

ETAPA	TEMPERATURA
Secagem	< 200°C para evitar decomposição da biomassa
Pirólise	Inicia em 200°C, com a decomposição da biomassa aumenta para 280 e 450°C
Combustão	A temperatura da zona de oxidação varia entre 800 e 1.200 °C
Redução	A reação de Bourdouard passa a ser mais importante na faixa de temperatura de 800 a 900 °C

Fonte: Martin et al., 2010

- Tempo de residência

Em um processo de distribuição de tempos de residência, o tempo de residência médio – (t_{res}) é um parâmetro importante, de modo que ele se remete ao tempo médio que os resíduos e os gases permanecem em contato dentro do reator. (LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE PROCESSOS QUÍMICOS, 2020).

Se um reator de leito fixo for utilizado no processo em questão, o tempo de residência será diretamente afetado pelo projeto e operação da placa; na escolha de um reator de leito fluidizado, tal parâmetro será limitado pela velocidade de fluidização do sistema. (LORA et al., 2012).

- Razão equivalente

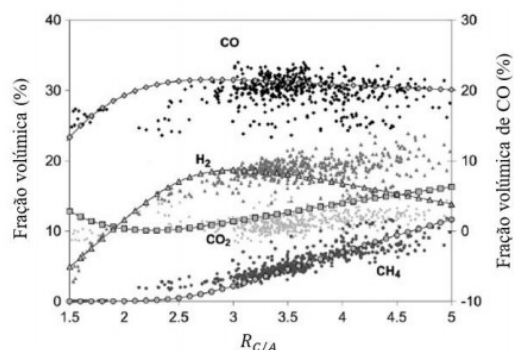
Trata-se da razão entre a quantidade de oxigênio e a ideal para ocorrer a combustão. Matto (2017) afirma ser de extrema importância quantificar o teor de oxigênio disponibilizado para o reator de gaseificação, pois afeta diretamente a composição do gás e seu poder calorífico. Isso é realizado por meio razão de equivalência (RE), definida pela razão da relação ar-combustível real sobre relação ar-combustível estequiométrico conforme se observa na equação abaixo.

$$RE = \frac{\text{ar/combustível real}}{\text{ar/combustível esteq.}}$$

Valores próximos de zero correspondem a condições da pirólise (onde não há presença de oxigênio), enquanto valores iguais ou maiores que um indicam um processo de combustão (ARENA, 2012).

A figura 12 abaixo demonstra como a fração volumétrica dos gases pode ser afetado pelas diferentes razões equivalentes.

Figura 12. Frações volumétricas dos gases produzidos em função da RE



Fonte: Castanheira, 2017 Adaptado de Melgar et al., 2007

Como é possível observar, para valores de RE da combustão, há um máximo de produção de hidrogênio, um mínimo para a produção de dióxido de carbono, uma estagnação para a produção do monóxido e crescimento para a geração de metano (CASTANHEIRA, 2017, p.9)

- Agente de Gaseificação

O agente de gaseificação é determinante para os resultados obtidos no processo pois influencia todas as reações descritas anteriormente (CASTANHEIRA, 2017, p.11). A Tabela 13 contém as principais vantagens e desvantagens dos diferentes agentes que podem ser utilizados no processo de gaseificação.

Tabela 13. Vantagens e Dificuldades dos diferentes Agentes de Gaseificação

AGENTES DE GASEIFICAÇÃO	VANTAGENS	DIFICULDADES TÉCNICAS
Ar	Baixo custo; Combustão parcial do resíduo para geração de energia; Teor mediano de particulados e alcatrão	Baixo poder calorífico do gás
Vapor	Alto poder calorífico no gás devido a presença de H ₂	Necessária uma fonte de calor externa para gerar vapor
Oxigênio	Gás de síntese não é diluído por nitrogênio como é no caso do ar, o que aumenta o poder calorífico do mesmo; Ausência do alcatrão no gás produzido pelas altas temperaturas de operação	Necessária uma planta de separação do ar (O ₂ do N ₂);
Dióxido de carbono	Alto poder calorífico do gás e grande presença de H ₂ e CO	Necessária limpeza catalítica do gás, e alta temperatura para o dióxido ter reatividade,

Fonte: Adaptado pelo próprio autor de Lora et al., 2012

- Tipos de Reatores

Posteriormente, tem-se que o gaseificador é o reator no qual acontece a conversão termoquímica do material carbonáceo tratado. Existem vários reatores, a Tabela 14 apresenta a descrição de cada um dos gaseificadores.

Tabela 14. Tipos de Reatores

GASEIFICADOR	CARACTERÍSTICAS
Fluxo contracorrente	Gaseificadores com carga e fluxo de ar em sentidos contrários. O agente gaseificador é insuflado para o leito fixo de combustível em direção oposta no sentido do movimento do combustível.
Fluxo Co-corrente	Tem processo parecido com o anterior, mas ocorre no mesmo sentido, fluxo de ar e carga seguem o mesmo movimento.
Fluxo cruzado	Resíduo é alimentado pela parte superior do reator, enquanto o agente de gaseificação é alimentado em uma das paredes laterais
Leito fluidizado	Gaseificação em leito fluidizado foi originalmente desenvolvida para resolver os problemas operacionais dos reatores de leito fixo, como alimentação com alto teor de cinzas e principalmente para incrementar a eficiência.
Leito arrastado	Esse reator é do tipo pistonado e apresenta correntes ascendentes e descendentes, onde o combustível sólido, e o agente gaseificante são alimentados a pressões da ordem de 20 bar e temperaturas superiores a 1200 °C, concorrentemente. O gás de síntese obtido no processo possui poder calorífico elevado e é praticamente livre de hidrocarbonetos pesados

Fonte: adaptado pelo próprio autor a partir de Nascimento, 2014; PUC RIO, 1986.

Diante disto, compreende-se as vantagens e desvantagens dos tipos de reatores, descritos abaixo.

Tabela 15. Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Tipos de Reatores

GASEIFICADOR	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Fluxo Contracorrente	Aceita partículas com diferentes tamanhos; baixa queda de pressão; boa eficiência térmica; baixo conteúdo de particulados; gases gerados deixam o reator a baixas temperaturas	Alta qualidade do alcatrão gerado; tempo longo para partida do motor de combustão; menores condições para reatividade de maneira volátil.
Fluxo Co-corrente	Baixos níveis de alcatrão decorrente da pirólise, que passa por combustão, flexibilidade de adaptação de produtos de gases para carga	Tamanho crítico de partícula; umidade crítica; alto conteúdo de particulados; gases gerados que deixam o reator a altas temperaturas;
Fluxo Cruzado	Equipamento simples de ser construído; Temperaturas inferiores com componentes mais baratos	Teor de alcatrão produzido é elevado; Difícil de operar
Leito fluidizado	Habilitado para o processamento de combustíveis com diferentes características	Muito caro para pequenas escalas; produção de alcatrão intermediário;
Leito arrastado	Gás a partir do poder calorífico médio sem uso de oxigênio	Produção significativa de alcatrão, dependente de transferência de calor e massa

Fonte: Miranda, 2014

Definidos os parâmetros que afetam a operação de um sistema de gaseificação, é necessário entender alguns parâmetros que determinam o desempenho do mesmo.

- Poder calorífico

As aplicações do “syngas” produzido na gaseificação varia de acordo com a composição do mesmo, como mostra a Tabela 16 abaixo.

Tabela 16. Características desejáveis do gás de síntese para produção de metanol, hidrogênio e combustíveis

Produto	Combustíveis Sintéticos/FT Gasolina e Diesel	Metanol	Hidrogênio
H ₂ /CO	0,6 ¹	2,0	Alto
CO ₂	Baixo	Baixo ³	Indiferente ²
Hidrocarbonetos	Baixo ⁴	Baixo ⁴	Baixo ⁴
N ₂	Baixo	Baixo	Baixo
H ₂ O	Baixo	Baixo	Baixo ⁵
Contaminantes	Enxofre <1 ppm	Enxofre <1 ppm	Enxofre <1 ppm
Poder Calorífico	Indiferente ⁶	Indiferente ⁶	Indiferente ⁶
Pressão, bar	~20-30	~50 (fase líquida) ~140 (vapor)	~28
Temperatura, °C	200 – 300 ⁷ / 300-400	200-300 ¹ / 300-400	100-200

Fonte: Adaptado pelo próprio autor de Lora et al.,2012

Diante da Tabela 16 e seus elementos, tem-se a descrição dos itens numerados acima: 1) depende do tipo de catalisador; 2) a reação de deslocamento água/gás pode consumir o CO₂ gerado e converter o CO em H₂; 3) Se a relação H₂/CO for superior 2, uma certa quantidade de CO₂ pode ser tolerada. Excesso de H₂ converte o CO₂ em metanol; 4) Devem ser retirados com intuito de aumentar a conversão do gás de síntese; 5) Necessária para reação de deslocamento água/gás; 6) Não é crítico enquanto a relação H₂/CO estiver mantida e; 7) Depende do tipo de catalisador.

Além das aplicações citadas acima, o gás de síntese também pode ser utilizado para produção de energia elétrica ou diretamente em turbinas a gás ou motores alternativos de combustão interna, se tiverem um poder calorífico mais baixo (LORA et al., 2010).

Uma etapa extremamente importante do processo é a limpeza do syngas, que deve ser implementada de acordo com a finalidade que ele será utilizado a partir da qualidade requerida. A tabela 20 abaixo mostra as impurezas presentes no gás, os possíveis problemas e como eles podem ser mitigados.

Tabela 17. Impurezas no syngas, fontes e mecanismos de controle

Impurezas	Fonte	Possíveis problemas	Mecanismos de controle
Particulados	Cinza, carbono, material do leito	Incrustações e poluições ambientais	Filtragem e lavagem do syngas
Metais alcalinos	Cinzas	Corrosão	Resfriamento, filtragem
Compostos Nitrogenados (NO _x , NH ₃ , HCN)	Reação do nitrogênio do ar e do resíduo	Corrosão e poluição ambiental	Tratamento com substâncias de caráter básico
Compostos de enxofre e cloro (HCl, H ₂ S)	Reação do enxofre e do cloro no resíduo	Corrosão e poluição ambiental	Lavagem
Alcatrão (mistura de hidrocarbonetos)	Baixo	Corrosão e prejuízos a saúde	Remoção, craqueamento

Fonte: Adaptado pelo próprio autor de Lora et al., 2012

O poder calorífico do gás de síntese, inclusive, mede sua qualidade e pode chegar a 9000 kcal/Nm³, o equivalente ao gás natural (ABCM, 2020).

- Eficiência da gaseificação

A eficiência do gás produzido pode ser calculada de duas maneiras: a quente e a frio. A eficiência a frio é definida como a razão entre a energia química do syngas e a

energia química do combustível, enquanto a quente leva em consideração o calor sensível do gás de síntese e do resíduo na alimentação (ARENA, 2012). No geral, a eficiência a frio é levada em consideração por não considerar o calor sensível dos participantes do processo, objetivo não tão importante no processo (LORA et al., 2012).

Por fim, é necessário considerar o efeito da composição do alcatrão gerado, pois este pode causar problemas nos equipamentos do processo (ARENA, 2012).

Apesar da alta complexidade inerente ao processo de gaseificação descrito acima, é inegável a sua relevância no cenário de geração de energia de uma forma limpa. Enquanto as usinas convencionais de transformação de energia que fazem a incineração dos resíduos sólidos geram em média 550 kWh para cada tonelada de RSU, a gaseificação poder ser usada para produzir até 1000 kWh para a mesma quantidade de resíduo processado (GLOBAL SYNGAS, 2016).

Dessa maneira, é natural que a expansão das plantas de gaseificação pelo mundo seja realidade. Segundo dados da mesma Global Syngas, 356 plantas com 863 gaseificadores estavam ativas no ano de 2016, um crescimento considerável se comparado aos 686 gaseificadores existentes no ano de 2015.

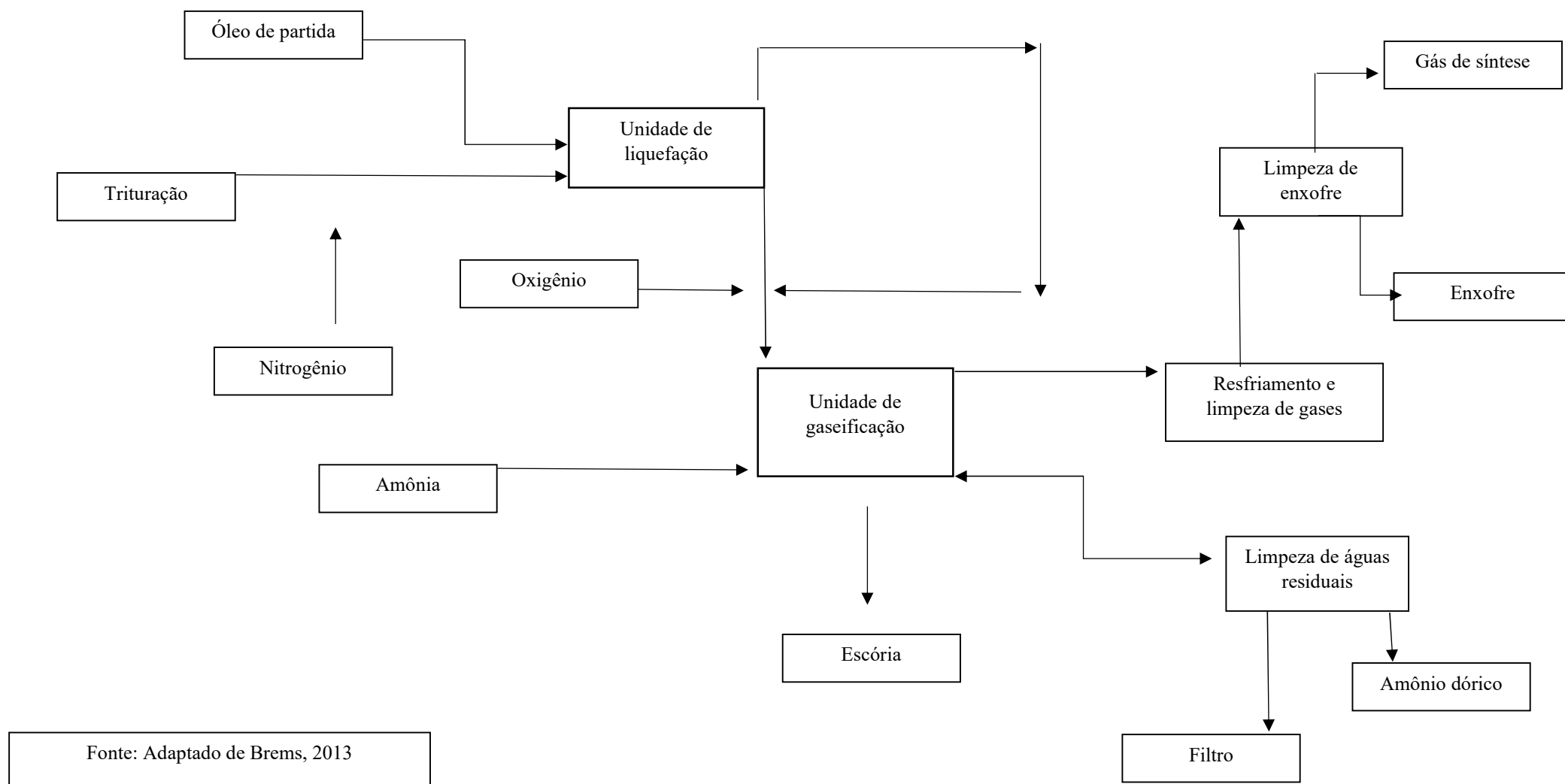
A partir dos agentes citados acima, compreende-se que muitos tipos de processos de gaseificação com diferentes matérias-primas já foram desenvolvidos e reportados. No entanto, não existe um modelo que seja aplicável a todos os casos; ou seja, não existe um processo de gaseificação universal e útil para todos os materiais. Diante disto, serão apresentados alguns estudos que demonstram processos de gaseificação diversos, obtendo consequentemente, diferentes produtos.

Rodrigues (2008) realizou um estudo com o objetivo de analisar uma planta piloto no processamento de resíduos sólidos de uma empresa calçadista (biomassa), para posteriormente, reaproveitar a matéria com geração de energia elétrica. A planta teve por base a gaseificação e a combustão, com controle de poluição do ar. A análise do gaseificador foi realizada por meio de matemática. Foram realizados dois modelos matemáticos, sendo um de – um modelo rigoroso e um modelo simplificado. Ambos os modelos propostos possibilitaram a representação de um sistema experimental, com identificação de pressupostos que geraram coerência e eficiência na planta proposta.

Um estudo produzido por Oliveira (2010) relacionou a produção de gás de síntese, a partir da gaseificação de resíduos de produção madeireira e cafeeira. Foram analisados

dados de produção química, com os resíduos submetidos a gaseificação. Houve o monitoramento do gás de síntese com relação a sua concentração volumétrica. Posteriormente, analisou-se dados referentes aos agentes gaseificantes. Diante disto, os resultados permitiram compreender que os resíduos apresentaram diferenciação na composição, sendo que o gás de síntese de palha de café o que maior apresentou calorífico, com predomínio de monóxido de carbono. Com relação a madeira, o cavaco de eucalipto apresentou maior concentração de monóxido de carbono, com desempenho operacional entre as biomassas.

Já para a gaseificação de resíduos plásticos, estudo desse trabalho, um dos modelos mais conhecidos é o da Texaco. O modelo propõe uma etapa de liquefação, com a quebra do plástico a partir do óleo sintético e alguns gases condensáveis. Posteriormente, tem-se a gaseificação realizada com o oxigênio e o vapor com temperatura ente 1200 a 1500°C. Processamentos de limpeza são realizados, com posterior secagem, consistindo majoritariamente em CO e H₂, mas quantidade inferiores de CH₄, H₂O e outros gases também são notados. O volume diário de gás de síntese produzido é de cerca de 350.000 Nm³ (AL-SALEM; LITTIERI, 2009). O processo em questão está contido na Figura 13.

Figura 13. Diagrama esquemático do processo de gaseificação e liquefação da Texaco

5. CORRELAÇÃO ENTRE RECICLAGEM MECÂNICA E QUÍMICA

Mostrou-se, anteriormente, a caracterização dos tipos de reciclagem existentes. Entretanto, não se fez um comparativo entre a reciclagem mecânica e a química, ambas muito utilizadas no cenário mundial e brasileiro. A Tabela 18 sintetiza as principais diferenças existentes.

Tabela 18. Diferenças entre Reciclagem Mecânica e Química

RECICLAGEM MECANICA	RECICLAGEM QUIMICA
Reduz o tamanho do produto	Quebra total ou parcial dos polímeros
Transforma o produto em matéria prima secundária	Produz nova matéria prima
Economicamente mais barato	Alto custo para se realizar
Promove empregabilidade	Recupera compostos químicos
Trata apenas resíduos termoplásticos	Pode tratar resíduos termofixos e plásticos

Fonte: adaptador pelo próprio autor a partir de Sabó, 2020

A atuação da reciclagem química no Brasil ainda é muito pequena. De acordo com Hentoux (2018), esta é muito utilizada em países europeus e no Japão, onde são utilizadas plantas para o processamento de resíduos sólidos urbanos, o que não existe em larga escala em nosso país.

Como já foi citado anteriormente, a reciclagem mecânica é o tipo de reciclagem mais utilizado no país, sendo um processo mais simples de ser executado com menor custo de implementação.

Entretanto, ambos os tipos de tratamento de resíduos apresentam algumas desvantagens. A reciclagem mecânica apresenta os seguintes pontos fracos, como sugere Leandro (2014):

- O preço da matéria virgem do polímero, não apresenta um custo extremamente alto;
- Ausência de um sistema de coleta seletiva e limpeza urbana;
- Déficits na estrutura físico-química dos polímeros reciclados, pois após o processamento ocorre a diminuição da massa molar do polímero decorrente do cisalhamento no processo, sendo necessário acrescentar resina virgem ou aditivos para que o polímero tenha as características desejadas.

Já a reciclagem química apresenta os seguintes pontos que a enfraquecem, de acordo com Ecycle (2018):

- Materiais que após a reciclagem podem conter resíduos contaminantes em sua composição;
- Produtos perdem a capacidade de serem reciclados novamente;
- Liberação de hidrocarbonetos e gases poluentes;

No caso da gaseificação, em específico, as preocupações ambientais são ainda maiores: além da emissão de gases poluentes como monóxido de carbono, óxidos de enxofre e de nitrogênio, entre outros, o gás hidrogênio (H₂) produzido é extremamente inflamável e suscetível a explosões (SIKARWAR; ZHAO,2017).

Nesta perspectiva, Spinacé e de Paoli (2005, p. 70) indicam que:

A reciclagem de forma sistemática é uma das soluções mais viáveis para minimizar o impacto causado pelos polímeros ao meio ambiente. Vários aspectos motivam a reciclagem dos resíduos poliméricos contidos nos resíduos sólidos urbanos, a economia de energia, a preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima: a redução de custos com disposição final do resíduo, a economia com a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a redução de gastos com a limpeza e a saúde pública e a geração de emprego e renda.

Dito isso, é possível compreender os diferentes aspectos que devem ser levados em consideração para cada tipo de reciclagem existente, assim como suas principais características e oportunidades de desenvolvimento. No fechamento do presente estudo, tal contexto será considerado para concluir o trabalho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo compreender os desafios que a reciclagem química e especificamente a gaseificação tem no Brasil e como eles podem ser superados para esse método ser uma alternativa viável junto a reciclagem mecânica, visando a melhorar o tratamento de resíduos plásticos em nosso país.

Diante disto, propôs-se uma revisão bibliográfica acerca da temática explorada, da qual foi possível extrair algumas conclusões que serão detalhadas a seguir.

Pelo levantamento feito na seção 5 e os dados apresentados no trabalho, é evidente que a reciclagem mecânica ocupa um papel de centralidade no tratamento de resíduos no Brasil. Afora o fato de ser um processo mais simples e conhecido a nível nacional, seu custo é consideravelmente mais baixo, além de gerar diversos empregos na sua cadeia de funcionamento. Ainda assim, está longe de ser uma prática difundida no Brasil, sendo necessário, portanto, muitos investimentos e ações para que seja adotada na escala necessária.

Algumas ações que podem ser citadas é a conscientização da população visando melhorar a separação dos resíduos e incentivos financeiros eficientes do governo a cooperativas. Como esse não é o objeto desse estudo, não estão aprofundadas no presente trabalho possíveis melhorias para o processo da reciclagem mecânica, mas podem e devem ser o foco de pesquisas futuras sobre o tema da reciclagem.

No mesmo sentido, a logística reversa, instituída no Brasil pela Lei Federal nº 12.305/2010, também é uma alternativa para o tratamento de resíduos e pouco explorada no país. Além de promover um destino correto para os resíduos sólidos gerados, uma maior execução desse processo pode trazer economias para as empresas que o adotarem, conscientizando também a população sobre a seriedade do assunto.

Após a Lei Federal nº 12.305/2010, outros documentos legais foram propostos com o objetivo de tornar mais regulamentado o processo de tratamento de resíduos. Em 2017, tem-se o Decreto nº 9.177, que regulamenta a o Art 33 da lei citada anteriormente, bem como complementa o Art 16 e 17 do Decreto de 2010, nº 7.404, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Por fim, tem-se o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, que regulamenta o inciso IV do caput do Art 33 e o Art 56 da Lei nº 12.305/2010, e complementa o Decreto

nº 9.177/2017, referente a implementação de sistema de logística reversa de produtos eletrônicos e seus componentes de uso doméstico.

Assim, nota-se um crescimento da tomada de consciência pela sustentabilidade, descarte e reciclagem de resíduos sólidos.

Dito isso, como levantado anteriormente, nem todos os resíduos plásticos podem ser reciclados mecanicamente, seja pela sua classificação (por não serem termoplásticos) ou por estarem contaminados com outros materiais, como alimentos, outros plásticos etc. Além disso, os plásticos reciclados mecanicamente podem adquirir características não desejáveis pós processamento, o que justifica a necessidade de outros tipos de tratamento de resíduos.

Dessa forma, mostra-se evidente a relevância da reciclagem química como metodologia de tratamento de resíduos de suma importância para o Brasil. Além de permitir o processamento de alguns materiais que estejam contaminados com outras substâncias, esse tipo de processamento possibilita a transformação de polímeros em monômeros para a confecção de novos produtos químicos, podendo também gerar gases que são utilizados na produção de combustíveis, entre outras aplicações.

Em razão disso, este trabalho defende que a reciclagem química seja também objeto de estudos e investimentos para a construção de uma política de reciclagem verdadeiramente integrada em nosso país.

Aprofundando a reciclagem química, este estudo mapeou os 4 principais processos utilizados nesse método: Hidrogenação, na qual o hidrogênio é utilizado para quebrar o polímero; Pirólise, em que o calor (sem oxigênio) faz a quebra das cadeias; Quimólise, que utiliza solventes para a recuperação dos monômeros; Por fim, a Gaseificação, processo analisado com mais detalhes no presente estudo.

A gaseificação é o processo em que há a produção de um gás de síntese a partir da combustão parcial do carbono contido no resíduo, realizada em 4 etapas principais: Secagem, Pirólise, Combustão e Redução. A partir do levantamento bibliográfico realizado, destacou-se os principais parâmetros que afetam esse processo, obtendo-se as conclusões descritas abaixo.

A primeira etapa de secagem é influenciada diretamente pelas características do material a ser tratado, como granulometria e temperatura, que podem afetar o desempenho

do processo. Dessa maneira, é essencial que o pré-tratamento do mesmo seja eficiente, assim como uma análise do desempenho das diferentes matérias-primas utilizadas no processo considerando os custos envolvidos nessa preparação.

Ademais, a temperatura é outro parâmetro extremamente importante na gaseificação, pois deve ter um valor adequado para que o carbono seja transformado por completo e não vire cinzas. No geral, o aumento da temperatura favorece a formação dos gases combustíveis. Porém, temperaturas mais elevadas requerem maiores medidas de segurança e equipamentos mais caros para suportá-las, o que deve ser levado em consideração na planta de gaseificação.

Outro parâmetro de operação expressivo é a razão entre a quantidade de oxigênio no oxidante e a que é necessária para a combustão completa em termos estequiométricos, chamada de razão equivalente. Tal variável influencia diretamente na composição do gás de síntese e do alcatrão produzido, e deve ser controlada para atingir os resultados desejados, o que eleva a complexidade do processo.

Além da razão equivalente, um componente com alta relevância no processo é o agente de gaseificação, que consiste no gás que é injetado no gaseificador para as reações ocorrerem. Utilizar ar como agente gaseificante é mais barato, porém gera um gás de síntese com poder calorífico menor. A utilização do oxigênio puro na alimentação aumentaria a qualidade do syngas porém elevaria também os custos de separação do ar. Dessa forma, é necessário um estudo aprofundado sobre o custo-benefício do agente de gaseificação utilizado, pois cada um tem suas vantagens e desvantagens e sua utilização depende do objetivo escolhido.

O mesmo raciocínio pode ser utilizado na escolha do reator para o processo. Esta decisão depende de fatores como a granulometria e composição do material que será tratado, capacidade humana de operação do equipamento, tolerância em relação aos valores de alcatrão produzido, entre outros.

Dito isso, independentemente do parâmetro monitorado, o objetivo final do processo da gaseificação é garantir um gás combustível de melhor qualidade com menor geração de contaminantes, com boas condições de operação e custos baixos. Porém, dada a complexidade do processo, muitas vezes alcançar um desses objetivos significa abdicar de outro, o que mostra a necessidade de estudos mais detalhados sobre o assunto, seja na

abordagem estequiométrica (discutindo os parâmetros citados) ou cinética, que envolve a velocidade das reações envolvidas.

Os impactos ambientais também não podem ser descartados. Apesar de promover um destino adequado para os resíduos, a gaseificação pode liberar gases poluentes e causar acidentes pelos gases altamente explosíveis gerados. Dessa maneira, é necessário fazer uma análise dos custos requeridos para o tratamento desses gases e instalação de equipamentos que sejam adequados, sendo imprescindível garantir segurança ao meio ambiente e funcionários envolvidos no processo.

Por fim, a gaseificação (e também os outros métodos químicos de reciclagem) depende de um sistema de coleta eficiente. Assim como na reciclagem mecânica, é necessário que os materiais sejam coletados nos locais de geração, evitando que estes sejam despejados em aterros e descartados de maneira indevida. Como foi visto neste estudo, o sistema de coleta seletiva no país ainda é extremamente precário e deve ser alvo de investimentos por parte do governo, executando sua responsabilidade em garantir eficiência na gestão dos resíduos sólidos urbanos gerados.

Apesar dos possíveis entraves citados acima, a gaseificação se mostra uma alternativa viável ao tratamento de resíduos plásticos, seja pelas suas diversas aplicações na indústria química ou pela possibilidade de produção de energia elétrica em quantidades consideráveis.

Dessa forma, conclui-se que a reciclagem química e em específico a gaseificação devem ser focos de investimentos e estudos visando aprimorá-las para ampliar a política de tratamento dos resíduos plásticos gerados em nosso país, não sendo de nenhuma maneira substituta ou substituída em relação a reciclagem mecânica, e sim complementada.

Este trabalho se propôs a sistematizar a bibliografia a respeito da reciclagem química e mecânica afim de delinear os seus contornos gerais e aprofundar em suas diferentes etapas, detalhando os seus benefícios e identificando possíveis oportunidades de melhora para que sejam objeto de futuros estudos e investimentos.

REFERENCIAS

- ABCM. **Gaseificação.** 2020. Disponível em: https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=16&i_area=2
Acesso em: 27 nov 2020.
- ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. **Reciclagem - Benefícios da Reciclagem de PET.** 2019. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=49> Acesso em: 23 nov 2020.
- AL-SALEM, Sultan; LITTIERI, Paola. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. **Waste Management**, v.29, p.2625–2643, 2009.
- AMBIENTE BRASIL. **Reciclagem de Plástico.** 2020. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem_de_plastico.html Acesso em: 10 nov 2020.
- ANUÁRIO DA RECICLAGEM 2017-2018. **Importância da recuperação de resíduos Sólidos.** 2019. Disponível em: <https://ancat.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Anua%CC%81rio-da-Reciclagem.pdf> Acesso em: 19 out 2020.
- AQUINO, Afonso Rodrigues et al. **Sustentabilidade ambiental.** In: _____. (Orgs.) - 1. ed. - Rio de Janeiro: Rede Sirius; OUERJ, 2015.
- ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**, v.32, p.625–639, 2012.
- BARBOSA, Gisele Silva. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, v.1, n.4, p.1-11, - Jan/Jun 2008.
- BLUEVISION. **Mecânica, energética ou química? Como os tipos de reciclagem funciona?** 2020. Disponível em: <https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/> Acesso em: 19 nov 2020.
- BNDES. Banco Nacional do Desenvolvimento. **Fundo Clima – subprograma de resíduos sólidos.** 2020. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-residuos-solidos> Acesso em: 23 nov 2020.
- BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Ministério da Casa Civil. Brasília, DF, 2010.
- _____. Casa Civil. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Ministério da Casa Civil. Brasília, DF, 2010.
- _____. Casa Civil. **Decreto nº 9.177**, de 23 de outubro de 2017. Regulamenta o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos

Sólidos, e complementa os art. 16 e art. 17 do Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 e dá outras providências. Ministério da Casa Civil. Brasília, DF, 2017.

_____. Casa Civil. **Decreto nº 10.240**, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Ministério da Casa Civil. Brasília, DF, 2020.

BREMS, Anke et al. Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route. **Natural Science**, v.5, n.6, p.695-704 (2013)

CANELÓI, Tathyana Pelatieri. Reciclagem, desenvolvimento sustentável e ICMS. IN: **Anais... XIX Encontro Nacional do CONPEDI realizado em Fortaleza - CE nos dias 09, 10, 11 e 12 de Junho de 2010.**

CASTANHEIRA, Diogo Filipe Duarte. **Estudo de um sistema de gaseificação para cogeração – Estudo experimental e de aplicação.** 2017. 114f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Mecânica] Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2017.

CASTANHARO, Ana Maria; UEHARA, Juliana; OLIVEIRA, Simone Lima de. **Reciclagem do plástico: uma alternativa da logística reversa para garantir a responsabilidade ambiental na empresa Bertin Ambiental Lins – SP.** 2009. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Administração] Centro Universitário Católica Salesiano Auxilium, 2009.

CAVALCANTI, Agostinho Paula Brito. Sustentabilidade ambiental como perspectiva de desenvolvimento. **R. Inter. Interdisc. INTERthesis**, Florianópolis, v.8, n.1, p. 219-237, jan/jul. 2011.

CHRESTANI, Alexandre Ghidini. **Reciclagem mecânica de disquetes de 31/2 polegadas de consumo.** 2010. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso [Engenharia de Materiais] Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

COELHO, Rivaldo Teodoro. **Contribuição ao estudo da aplicação de materiais alternativos nos compósitos a base de cimento Portland: Uso de grãos de polipropileno reciclado em substituição aos agregados do concreto.** 2005. 165f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil] Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

JORNAL CRUZEIRO DO SUL. **Os desafios da reciclagem do plástico.** 2019. Disponível em: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/meio-ambiente/os-desafios-da-reciclagem-do-plastico/> Acesso em: 22 nov 2020.

ECYCLE. **O que é reciclagem energética?** 2020. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/3644-reciclagem-energetica.html> Acesso em: 10 nov 2020.

FONSECA, L. H. A. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, p. 1-30, 2013.

FRAGMAQ. **Conhecendo o conceito de reciclagem mecânica**. 2017. Disponível em: <https://www.agmaq.com.br/blog/conhecendo-o-conceito-de-reciclagem-mecanica/> Acesso em: 10 nov 2020.

_____. **Entenda o que define e como funciona a reciclagem química**. 2017. Disponível em: <https://www.agmaq.com.br/blog/entenda-o-que-define-e-como-funciona-reciclagem-quimica/> Acesso em: 20 nov 2020.

GLOBAL SYNGAS. **The gasification industry**. 2020. Disponível em: <https://www.globalsyngas.org/resources/the-gasification-industry/> Acesso em: 27 nov 2020.

HENTOUX, Miguel Ângelo. **Análise da cadeia de valor da reciclagem de PET com ênfase no PET-PCR grau alimentício**. 2018. 39f. Monografia [Graduação em Engenharia Química] Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

HOLZER, Gisele dos Santos Augusto. **Lixo, coleta seletiva e reciclagem**. 2012. 35f. Monografia [Especialização em Ensino de Ciências] Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira, Medianeira, 2012.

IDEC. **Lixo**. S/d. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/publicacao/140_publicacao09062009031109.pdf Acesso em: 21 out 2020.

IPEA. **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. – Brasília: Ipea, 2010.

_____. **Financiamento do BNDES para a reciclagem**. 2016. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=3211&catid=29&Itemid=34 Acesso em: 22 nov 2020.

LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE PROCESSOS QUÍMICOS. **Distribuição de tempos de residência (dtr)**. 2007. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=163&Itemid=320#2 Acesso em: 20 nov 2020.

LA ROCHA, Melissa Rodrigues de. **Simulação de um reator de combustão e gaseificação através de uma rede de reatores equivalentes baseada em fluidodinâmica computacional**. 2016. 117f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Química] Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LEANDRO, Inaê Fernandes. **Estudo das alternativas tecnológicas para a reciclagem de polímeros de densidades variadas e conceito de empreendedorismo social nas indústrias de reciclagem**. 2014. 50f. Monografia [Engenharia Química] Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP. Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

LORA, Electo et al. **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. **Biocombustíveis**, 2012.

MÄHLMANN, Cláudia Mendes; LAWISCH, Adriane de Assis; KIPPER, Liane Mählmann. Estudo da reciclagem por termo-prensagem de polipropileno (pp) pós-uso. In: **Anais... ICTR – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**, Costão do Santinho – Florianópolis – Santa Catarina, 2004.

MANTOVANI, Guilherme Augusto. **Reciclagem Mecânica de Resíduos de Rótulos e Etiquetas Utilizando Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2015. 72f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Mecânica] Departamento de Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

MANUAL DO PROGRAMA PELLET ZERO. OCS®. **O Plástico**. 2ª edição. São Paulo: Plastivida, 2020. (1ª ed. - 2018: Manual Perda Zero de Pellets).

MATTAR, Danilo Charbel; VIANA, Edson. Utilização de resíduos poliméricos da indústria de reciclagem de plástico em blocos de concreto. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.8, n.8, p.1722-1733, 2012.

MIRANDA, Gilliani Peixoto. **Modelagem e simulação de reatores de leito fluidizado para gaseificação da biomassa**. 2014. 130f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Química] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. **Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável**. 2018. 339f. Tese [Doutorado em Engenharia Química] Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

NASCIMENTO, Felipe da Silva. **Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal**. 2014. 103f. Dissertação [Mestrado em Ciências] Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

NEIMAN, Zysman; RABINOVICI, Andrea; SOLA, Fernanda. A questão ambiental, a sustentabilidade e inter, pluri ou transdisciplinaridade. In: **Sustentabilidade ambiental [recurso eletrônico]: estudos jurídicos e sociais / org. Belinda Pereira da Cunha, Sérgio Augustin**. - Dados Eletrônicos. Caxias do Sul, RS: Educs, 2014.

OLIVEIRA, Jofran Luiz de. **Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto**. 2010. 97f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Agrícola] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

OLIVEIRA, Patrícia Azevedo; CRUZ, Sthefani Firmino. **Gaseificação: processo alternativo para a recuperação energética e eliminação de resíduos sólidos urbanos**. 2016. 69f. Monografia [Tecnólogo em Hidráulica e Saneamento Ambiental] Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2016.

PÊSSOA, Vitor Alves de Figueiredo. **Reciclagem e reutilização de materiais poliméricos plásticos**. 2018. 50f. Projeto [Graduação em Engenharia de Materiais] Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PGIRP. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Plásticos**. Carla Valéria Lima Cândido... [et al.]. -- Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente: Fundação Israel Pinheiro, 2009.

PLASTIVIDA. Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos. **Brasil recicla mecanicamente 21% dos plásticos**. 2012. Disponível em: http://www.plastivida.org.br/images/releases/Release_091_Reciclagem_Plasticos_.pdf Acesso em: 10 nov 2020.

_____. **Reciclagem Mecânica**. 2020. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/plastivida/posicionamento/71-reciclagem-mecanica?lang=pt> Acesso em: 10 nov 2020.

_____. **Reciclagem Energética**. 2020. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/plastivida/posicionamento/11-reciclagem-energetica?lang=pt#:~:text=O%20processo%20de%20reciclagem%20energ%C3%A9tica,encaminhado%20para%20a%20reciclagem%20energ%C3%A9tica>. Acesso em: 12 nov 2020.

PLÁSTICO VIRTUAL. **Etapas do processo de reciclagem do plástico**. 2017. Disponível em: <https://plasticovirtual.com.br/etapas-do-processo-de-reciclagem-do-plastico/#:~:text=Na%20reciclagem%20mec%C3%A2nica%2C%20que%20%C3%A9,que%20reduzem%20o%20seu%20tamanho>. Acesso em: 19 nov 2020.

_____. **Reciclagem de plástico: a perda financeira e o que pode ser feito**. 2018. Disponível em: <https://plasticovirtual.com.br/reciclagem-de-plastico-a-perda-financeira-e-o-que-pode-ser-feito/> Acesso em: 22 nov 2020.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Classificação do Lixo**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/classificacao-do-lixo> Acesso em: 20 out 2020.

PROPEQ. **Plásticos: o que são e tendências sustentáveis**. 2020. Disponível em: https://propeq.com/post/plasticos-tendencias-sustentaveis/?gclid=Cj0KCQjwit_8BRCoARIsAix3Rj5_bS3cxreqEIGHmJV6GOSOqFmTQ3QxR_PnCWXnLkNxFEzgsdIiAMaAqm_EALw_wcB Acesso em: 20 out 2020.

PUC RIO. **Gaseificação**. 1986. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/10023/10023_6.PDF Acesso em: 20 nov 2020.

RICCHINI, Ricardo. **Reciclagem de plásticos**. 2020. Disponível em: <https://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-plastico/reciclagem-de-plasticos/> Acesso em: 11 nov 2020.

RIOS, Izabela. **Valorização do plástico pós-consumo**. 2005. 93f. Dissertação [Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais] Programa de Pós-Graduação em Gestão e Políticas Ambientais. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

ROOTS. **Sustentabilidade ambiental Respondendo às mudanças ambientais e climáticas**. In: WIGGINS, Sarah; WIGGINS, Mike (Orgs.). _____. 2009.

RODRIGUES, Rodolfo. **Modelagem e simulação de um gaseificador em leito fixo para o tratamento térmico de resíduos sólidos da indústria calçadista**. 2008. 171f. Dissertação [Mestrado em Engenharia Química] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RODRIGUES, Geizibel Lopes; FEITOSA, Maria José da Silva; SILVA, Genilson Ferreira Lopes da. Cooperativas de reciclagem de resíduos sólidos e seus benefícios socioambientais: um estudo na COOPECAMAREST em Serra Talhada– PE. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade - RMS**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 18-38, jan./abr. 2015.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. Polímeros na indústria de embalagens. 2018. 59f. Monografia [Engenharia Química] Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ROSA, Bruna Nogueira et al. A importância da reciclagem do papel na melhoria da qualidade do meio ambiente. In: **Anais... ENEGEP - XXV Encontro Nac. de Eng. de Produção – Porto Alegre, RS, Brasil, 29 out a 01 de nov de 2005**.

SABÓ. **Reciclagem automotiva: um bom negócio para a economia e para o meio ambiente**. 2020. Disponível em: <https://www.sabo.com.br/caderninho/curiosidades/reciclagem-automotiva-um-bom-negocio-para-a-economia-e-para-o-meio-ambiente/> Acesso em: 22 nov 2020.

SIKARWAR, Vineet Singh; ZHAO, Ming. Biomass Gasification. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, 2017.

SILVA, Elaine Aparecida; MOITA NETO, José Machado. Possibilidades de melhorias ambientais no processo de reciclagem do polietileno. **Polímeros**, v.26, n.(número especial), p.49-54, 2016.

SOUZA, João Carlos. Reciclagem e sustentabilidade ambiental: a importância dos processos logísticos. **Transportes**, v. XIX, n. 1, p. 47-53, março 2011.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quim. Nova**, v. 28, n. 1, p.65-72, 2005.

TEXACO. **Logística reversa: o que é, como funciona e como aplicar**. 2018. Disponível em: <https://blog.texaco.com.br/ursa/logistica-reversa-o-que-e-como-funciona/> Acesso em: 27 nov 2020.

TRINDADE, Kelvin. **Estudo de viabilidade para uma empresa de reciclagem de plástico em Ijuí/RS**. 2015. 112f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Administração] Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.

UNIVASF SUSTENTÁVEL. **Reciclagem de plásticos: como se dá e no que se transformam?** 2018. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/reciclagem-de-plasticos-como-se-da-e-no-que-se-transformam> Acesso em: 10 nov 2020.

VASCONCELOS, Yuri. Planeta plástico. **Revista Fapesp**, ed.281, 2019.

VG RESÍDUOS. **Diferença entre lixo, resíduo e rejeito**. 2020. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/blogdiferenca-entre-lixo-residuo-rejeito/> Acesso em: 20 out 2020.

WASSERMANN, Adriana Inés. **Processamento e características mecânicas de resíduos plásticos misturados**. 2006. 98f. Dissertação [Mestrado em Engenharia] Departamento De Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.