

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano – IMA
Programa de Engenharia Ambiental



COQ860 - CIRCULARIDADE E ENGENHARIA DE POLÍMEROS - INTRODUÇÃO À RECICLAGEM

Professora Élen Vasques Pacheco
elen@ima.ufrj.br



Assuntos a serem abordados

- Apresentação - NERDES
- Definições
- Reciclagem na Economia Circular
- Etapas da reciclagem
- Separação dos resíduos
- Tecnologias de reciclagem
- Classificação e separação
- Formas de reciclagem
- Desafios
- Considerações finais

APRESENTAÇÃO DO NERDES





Nerdes

Núcleo de Excelência em Reciclagem
e Desenvolvimento Sustentável

1990: Professora Eloisa B. Mano -
Início da pesquisa em Reciclagem

2009: Consolidação Recicladora
em escala de laboratório

Responsáveis:
Leila Visconte
Élen Vasques Pacheco
Ana Nazareth da Silva

Grupo formado por: alunos de graduação, mestrado, doutorado e
técnicos contratados

Localização no IMA/ CT/ UFRJ



Objetivos do NERDES

- Desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis em tecnologia de polímeros.
 - Identificar os pontos críticos no processo de reciclagem.
- Obtenção de produtos reciclados em escala de laboratório a partir de resíduos da universidade - educação ambiental.



Definições

PNRS - Lei 12.305 (02/08/2010)

Objetivo: instituição de diretrizes para gestão integrada de resíduos, dispondo sobre princípios, objetivos e instrumentos.

Define:

Coleta seletiva - coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição.

Logística reversa - instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada

Rejeitos - resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

Disposição final ambientalmente adequada - distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

Resíduos sólidos - material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder...;

Destinação final ambientalmente adequada - destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético

Cap. II. - definições

Reciclagem: processo de transformação de resíduos com alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos.

Reutilização: processo de aproveitamento dos resíduos sem transformação biológica, física ou físico-química.

CAP. II- DOS PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

Art. 6 São princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

IV - o desenvolvimento sustentável;

V - a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta;

VII - a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos - instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada

VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;

IX - o respeito às diversidades locais e regionais;

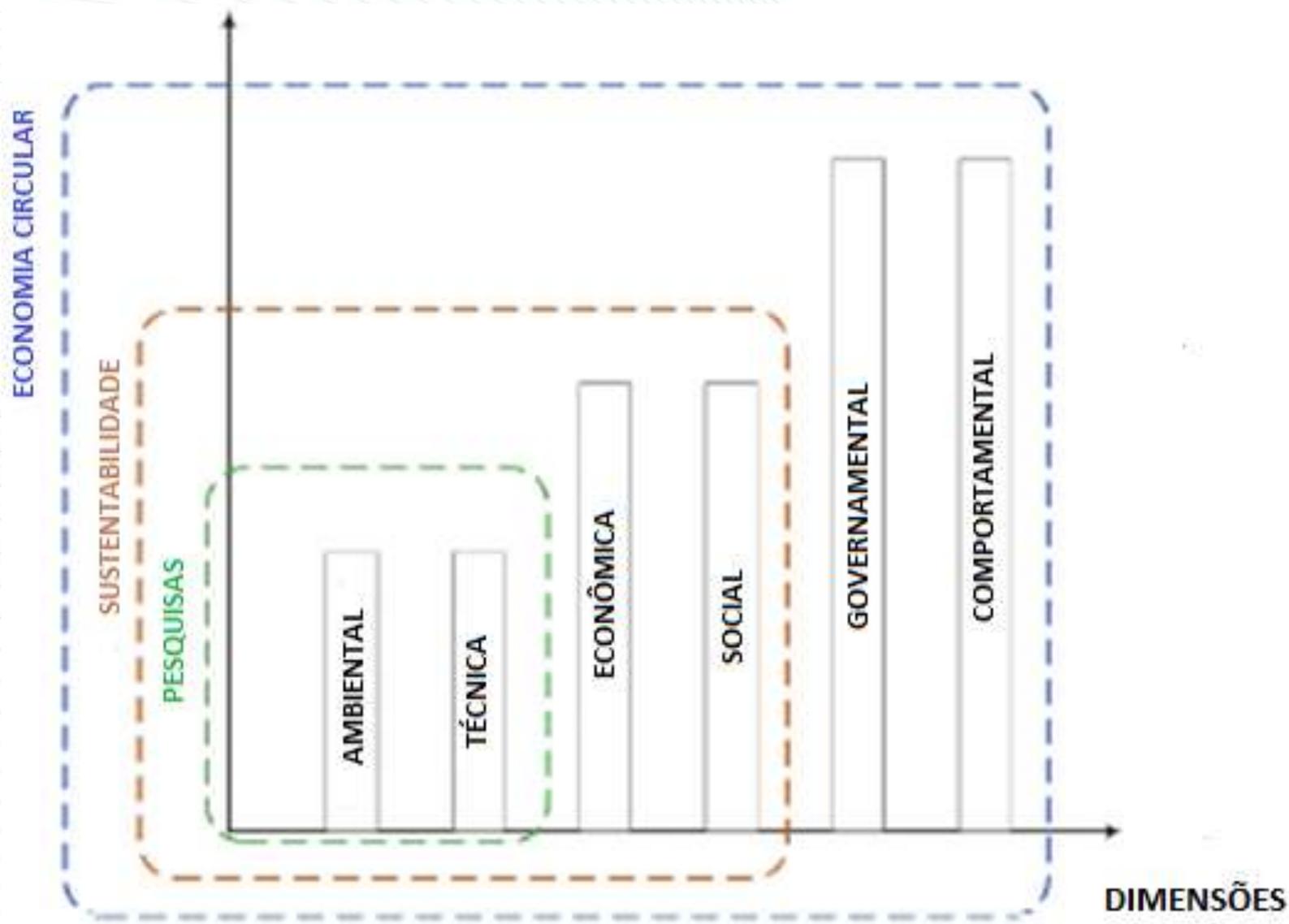
X - o direito da sociedade à informação e ao controle social;

Reciclagem na Economia Circular

ECONOMIA CIRCULAR

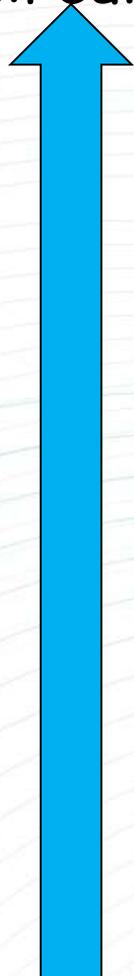
- Os materiais circulam no máximo de seu valor como nutrientes técnicos ou biológicos em sistemas:
 - Industriais integrados
 - Restaurativos
 - Regenerativos.

Conceito econômico no qual se respeita o ciclo da sustentabilidade.



Fonte: F. Pomponi, A. Moncaster, Circular economy for the built environment: A research framework, Journal of Cleaner Production 143, 710-718 (2017)

Economia
circular



Estratégias

Uso e fabricação mais inteligentes de produtos	R0 - Recusar
	R1 - Repensar
	R2 - Reduzir
Prolongamento da vida útil do produto e de suas peças	R3 - Reusar
	R4 - Reparar
	R5 - Reformar
	R6 - Remanufaturar
	R7 - Redirecionar
Aplicação útil de materiais	R8 - Reciclar
	R9 - Recuperar

Economia
linear

Fonte: J. Kirchherr, D. Reike, M Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, Resources, Conservation & Recycling 127 (2017) 221-232

Maior atenção aos impactos negativos relacionados à destinação de produtos com curto tempo de utilização

- ✓ Curto tempo de vida (< 1 ano) - embalagens.
- ✓ Médio tempo de vida (1-5 anos) - equipamentos eletroeletrônicos.
- ✓ Longo tempo de vida (> 5 anos) - automóveis (10-20 anos).
Construção civil (> 50 anos).

Meta: aumentar o tempo de utilização dos produtos através de educação ambiental para minimização de resíduos

Reciclagem na EC

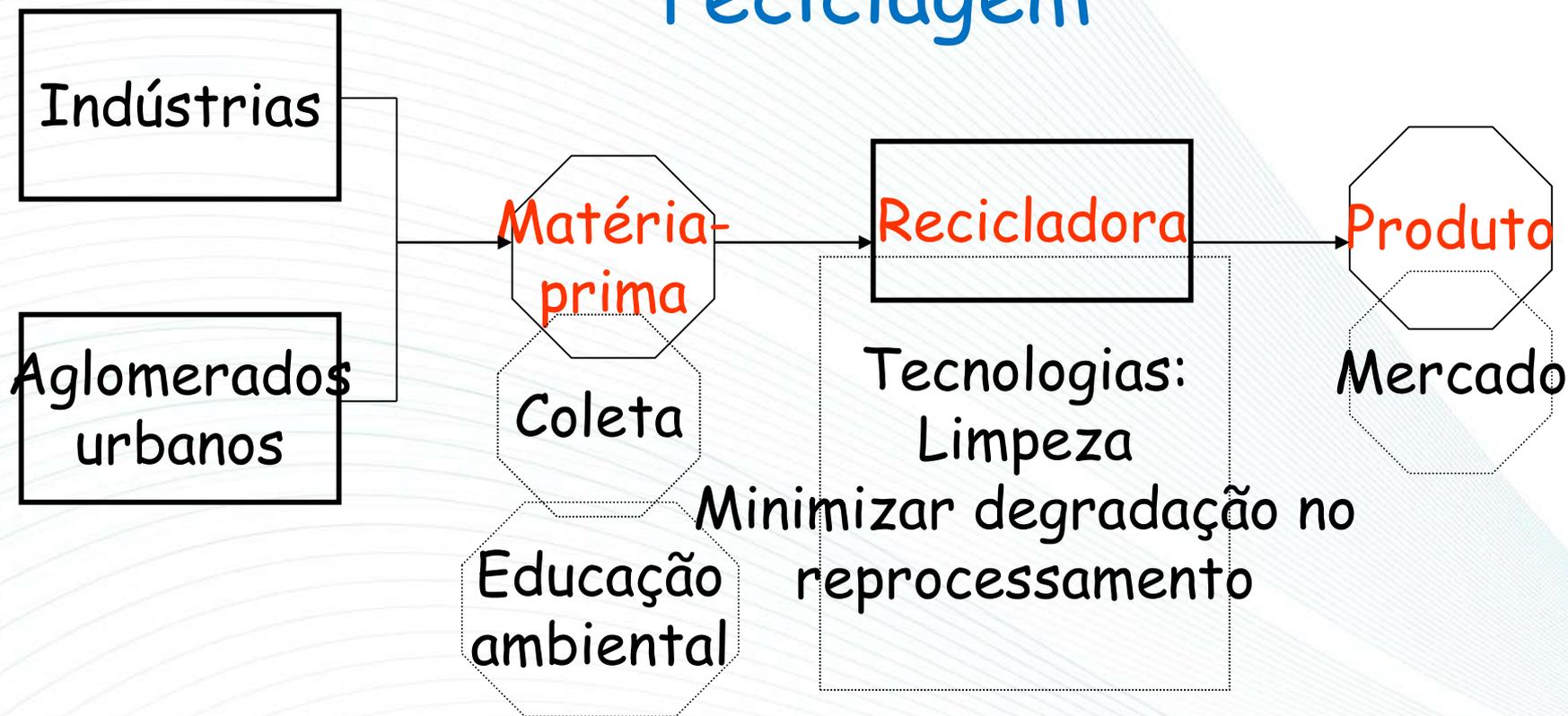
- Reciclagem de ciclo fechado (closed-loop recycling):
 - Quando os plásticos são reciclados para produzir o mesmo produto original.
 - O novo produto pode ser feito inteiramente de plástico reciclado, ou uma mistura de plástico reciclado e virgem.
- Reciclagem de ciclo aberto (open-loop recycling):
 - Quando os plásticos são reciclados para obtenção de um produto diferente do original.
 - O novo produto não necessariamente tem menor "valor" que o original. Ex. fabricação de fibras têxteis de garrafas de PET ou componentes de impressora de policarbonato de garrafa de água

Valor agregado na reciclagem

- up-cycling: é um processo em que os resíduos são convertidos em produto de maior valor e/ou qualidade que o material de origem.
- down-cycling: processo em que os resíduos são convertidos em produto de menor valor e/ou qualidade que o material original.

Obs. A reciclagem pode converter um material em algo com aproximadamente o mesmo valor que o original. Ex. vidro, metal.

Principais etapas de um processo de reciclagem



Atores envolvidos: Recicladores, Outras empresas, Universidades, População, Catadores, Governo e Prefeituras

Leis Ambientais

Formas da separação do resíduo

1º) Classificação dos resíduos quanto à toxicidade:

- Resíduos sólidos (NBR 10.004:2004) - Riscos potenciais ao meio ambiente:
 - **Classe I:** perigosos, que podem ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos;
 - **Classe II:** não-perigosos.

2º) Sistemas usados de triagem (coleta seletiva urbana)

- Coleta seletiva porta-a-porta: os moradores colocam os recicláveis acondicionados nas calçadas para coleta em dias e horários específicos.
- Coleta em postos de troca: o material separado no domicílio é trocado por algum bem ou benefício, que pode ser alimento, vale-transporte, vale-refeição e descontos.

Sistemas de triagem

- Coleta seletiva em Postos de Entrega Voluntária, PEV, ou em Locais de Entrega Voluntária, LEV: o cidadão, espontaneamente, deposita os recicláveis em contêineres.
 - Nos PEV ou LEV, cada material pode ser colocado em recipientes específicos.
 - Esses recipientes são coloridos para facilitar a deposição correta.

CORES - COLETA SELETIVA



Fonte: www.cempre.org.br em 11/2009

Resolução CONAMA 275 (2001) e ABNT NBR 13230:2008

Coleta Seletiva a partir do RSU -

Art. 35. Sempre que estabelecido sistema de coleta seletiva pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, os consumidores são obrigados a:

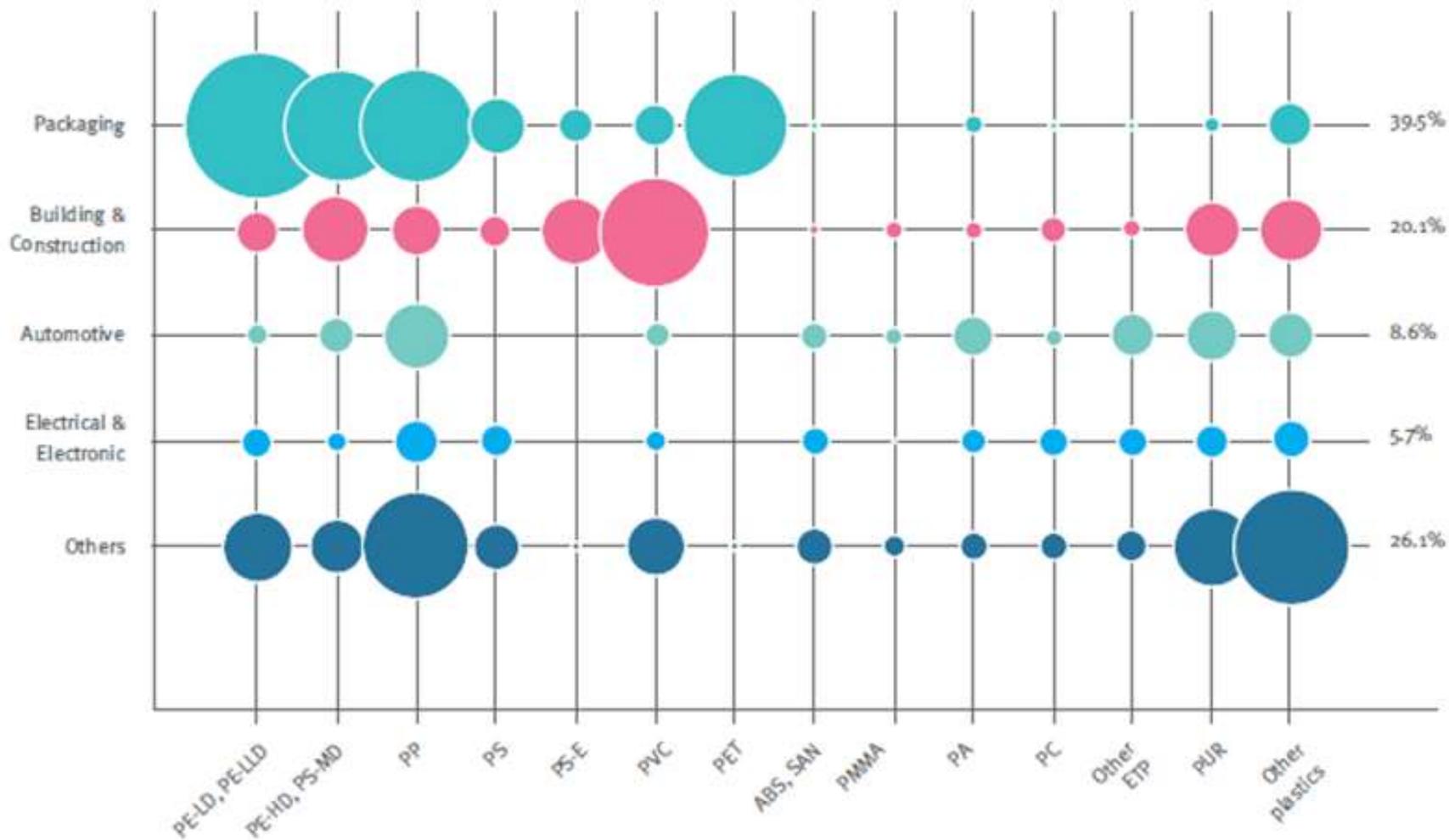
- I - acondicionar adequadamente e de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados;
- II - disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou devolução.
- Parágrafo único. O poder público municipal pode instituir incentivos econômicos aos consumidores que participam do sistema de coleta seletiva

Educação ambiental

- Peça fundamental para o sucesso de qualquer programa de coleta seletiva.
- Visa ensinar o cidadão sobre o seu papel como gerador de resíduo.
- Deve ser dirigida a escolas/universidades, toda a comunidade.

Exemplos de produtos plásticos

Plástico	Utilização
PEBD/LDPE	Sacos, sacolas, filmes
PEAD/HDPE	Bombonas, frascos de xampu
PP	Engradados, utensílios domésticos
PVC	Tubos rígidos de água, toalhas de mesa
PET	Frascos de refrigerantes
PS	Copos, pratos, talheres descartáveis



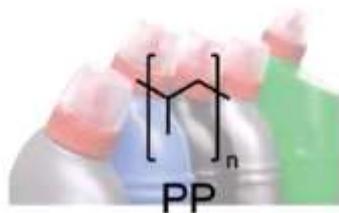
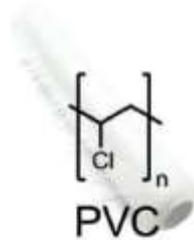
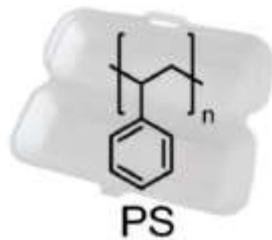
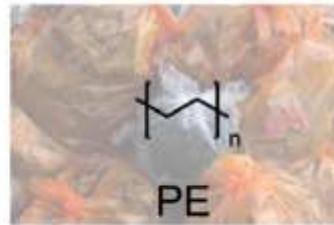
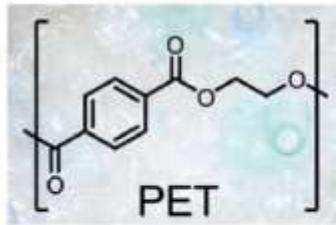
European plastics demand* by segment and polymer type 2014

Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / myCeppi

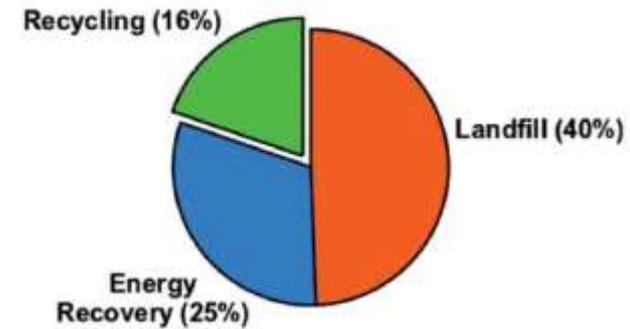
* EU-28+NO/GI

Fonte: Plastic Europe, Plastics - the Facts 2015 - An analysis of European plastics production, demand and waste data.

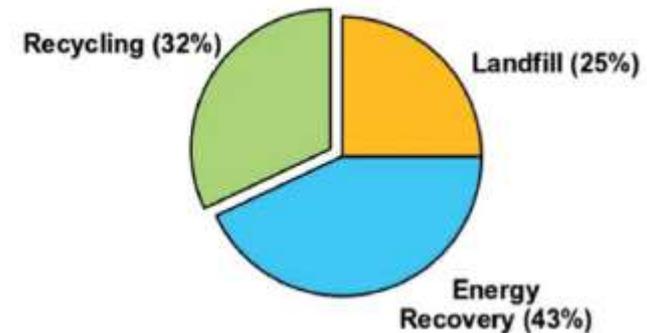
Principais polímeros em embalagens e suas destinações global e na Europa



Global



EU



Fonte: Zoé O. G. Schyns and Michael P. Shaver (2020). Doi: 10.1002/marc.202000415

Classificação dos polímeros

- Estrutura química
 - Poliésteres, poliamidas, poliolefinas
- Fusibilidade
 - Termoplásticos - fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento
 - Termorrígidos - quando aquecidos, assumem estrutura tridimensional com ligações cruzadas; insolúveis e infusíveis

Dificuldades na classificação e separação

- A variedade de plásticos e a diversidade de suas características tornam o processo de separação complexo e ineficiente, resultando em grandes perdas de valor do material.
- A identificação dos diferentes tipos de polímeros entre os resíduos plásticos não é suficientemente eficiente devido:
 - Variedade de cores, propriedades e formatos.
 - Materiais multicamadas
 - Plásticos escuros (especialmente pretos)
 - Plásticos compostáveis

Classificação e separação

- A classificação dos artefatos por seus materiais constituintes é importante para garantir um mínimo de desperdício e um produto reciclado de alta qualidade e, assim, ter maior eficiência na reciclagem (rótulos, tampas..)
- A composição dos plásticos (resíduos ou não) tem grandes variações de aditivos (retardadores de chama bromados, plastificantes, corantes...)
- A classificação é mais difícil para produtos de pequena dimensão ou leves.
- Após a moagem, é ainda mais difícil separar polímeros misturados a partir de fluxos de entrada para o processo de reciclagem.
- Deve-se realizar análises econômicas de custo-benefício de opções para buscar opções de separação X reciclagem.

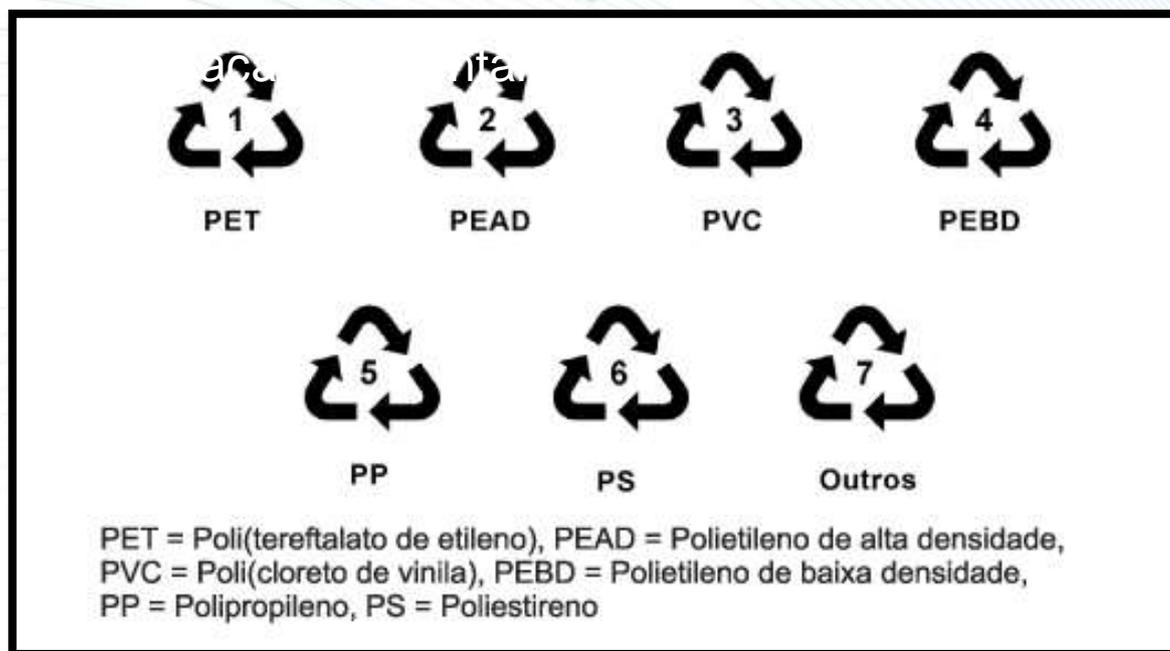
Formas de identificação para triagem

- Manual
- Simbologia nas embalagens
- Características:
 - Densidade
 - Ação do calor
 - Queima
 - Fusibilidade
 - Inchamento
 - Métodos de identificação

Separação manual



Símbolos de identificação de materiais recicláveis



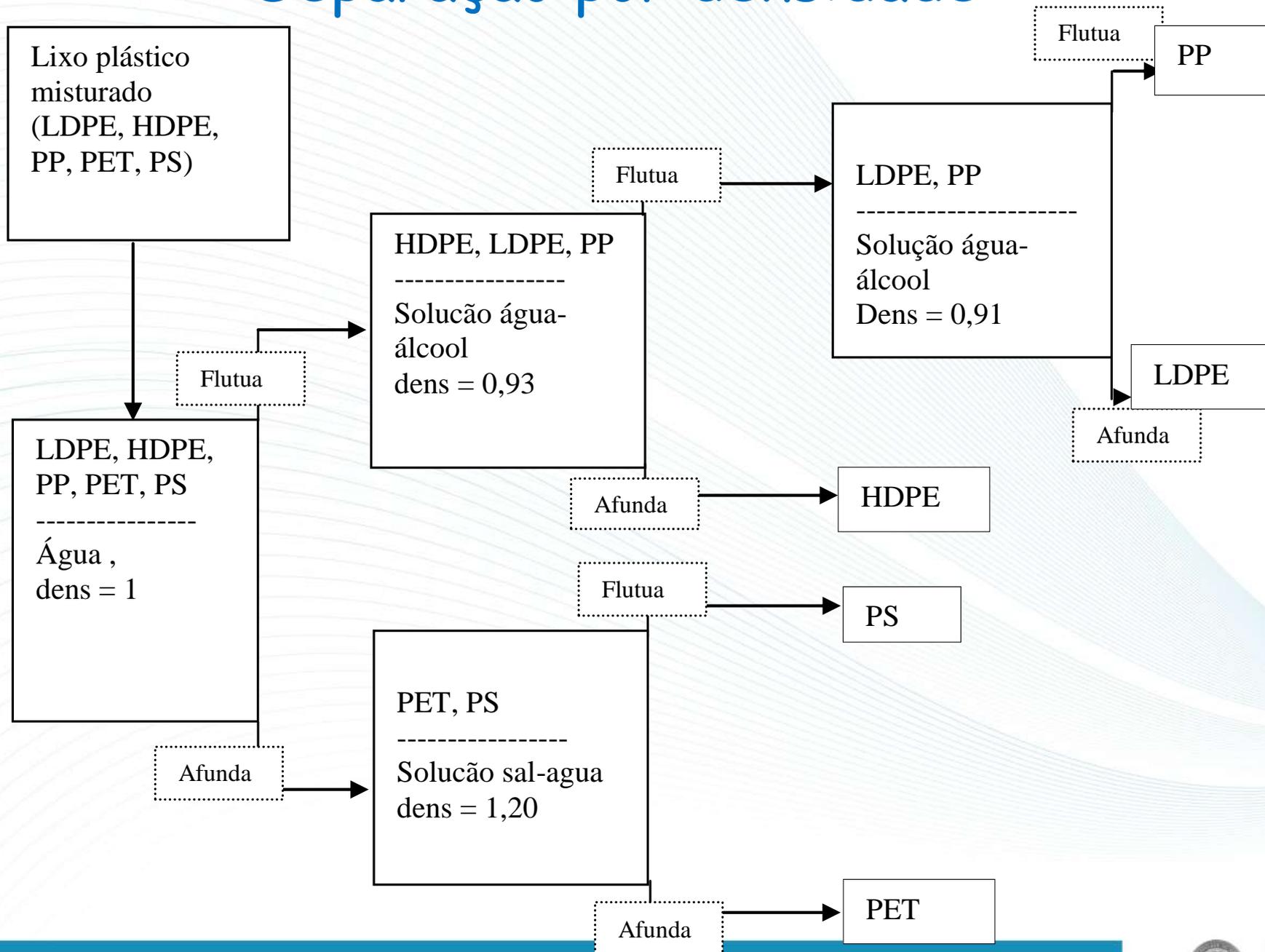
Características de alguns polímeros

Polímero	Ponto de fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)
LDPE	120	0,92-0,94
HDPE	135	0,94-0,97
PP	165-175	0,90
PS	235	1,05
PET	265	1,38
PVC rígido	273	1,39
PVC flexível	150	1,19-1,35
PC	268	1,20
PA-6	215-220	1,05-1,14
PMMA	160	1,18

Obs. Antigos recicladores usavam teste da chama



Separação por densidade



- Separação por via úmida: uso de hidrociclone e flotação - requerem mais desenvolvimentos para:
 - reduzir custos.
 - oferecer melhor seletividade em polímeros leves e polímeros com a mesma densidade.
- Separação a seco (ideal): métodos de identificação baseados em:
 - Infravermelho próximo (NIR) e RAMAN: permitem maior precisão e a identificação de aditivos (como bromados) em concentrações mais baixas e de aditivos orgânicos.
 - Raios-X e fluorescência de raios-X dispersiva de energia (XRF): podem ser aplicados a unidades de reciclagem menores, caso seus custos fossem reduzidos. Permitem identificar uma gama mais ampla de aditivos e aumentar a velocidade de classificação.
- Todas essas técnicas devem ser acopladas com mecanismos de triagem aprimorados (válvulas de ar, manuseio robótico) e devem ser testadas em escala piloto.

Separação automatizada com sensores



Fonte: <http://www.beveragecarton.eu/beverage-cartons/recycling/collection>,
acesso em 20/08/2015.

Possibilidades: uso de espectrofotômetro infravermelho visível próximo para:

- ✓ Separar o PET de outros plásticos (Wahab et al., 2006. doi:10.3844/ajassp.2006.1924.1928)
- ✓ Separar PET de bioplásticos (Hollstein et al., 2015. Identification of bioplastics by NIR-SWIR-Hyperspectral-Imaging. International Conference on , Optical Characterization of Materials OCM 2015).

O feixe de luz é movido sobre o fluxo de artefatos plásticos para que todos os produtos sejam atingidos pelo feixe.

- Busca-se o desenvolvimento de sensores com maior sensibilidade, precisão e menor custo para maior qualidade dos materiais separados e, conseqüentemente, reciclados.
- Ex. Os sistemas de detecção baseados em infravermelho próximo podem separar com segurança plásticos estirênicos de resíduos plásticos misturados e diferenciar com muita precisão entre HIPS (poliestireno de alto impacto) e PS cristal.

Formas de reciclagem

Dividida de acordo com a proveniência do material e o processo que será submetido

- Primária: feita na própria fábrica
- Secundária: a partir de lixo urbano (envolvido somente processos físicos)
- Terciária: transforma os resíduos poliméricos em monômeros ou oligômeros
- Quaternária: incineração com recuperação de energia

Formas de reciclagem

- Definições atuais (quanto ao processo)
 - Mecânica
 - Química
 - Energética

Reciclagem mecânica

- O processo de reciclagem mecânica constitui-se basicamente por lavagem, moagem, secagem e reprocessamento.
- O resultado da reciclagem mecânica é um artefato ou grânulos (*pellets*).

Reciclagem química

- Na reciclagem química o polímero é despolimerizado ou degradado a produtos de baixa massa molar (normalmente oligômeros)
- Esse método pode levar à formação de subprodutos e gasto de produtos químicos (solventes).
- Alguns fluxos de plásticos mistos podem ser adequados para uma rota de reciclagem química.

Reciclagem energética

- Na reciclagem energética, o plástico é queimado e a energia resultante da queima é utilizada.



Packaging recycling and energy recovery rate by country 2014
 (Referred to post-consumer plastics waste)
 Source: Consulfic

Fonte: Plastic Europe, Plastics - the Facts 2015 - An analysis of European plastics production, demand and waste data.

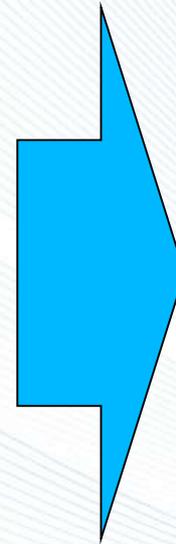


Desafios na reciclagem

Degradação do polímero pós-consumo

Sofrem diferentes tipos de degradação que levam ao decréscimo de suas propriedades por:

- ✓ Exposição à radiação ultravioleta
 - ✓ Exposição ao intemperismo, poluição
- ✓ Contato com ambiente quimicamente agressivo
- ✓ Solicitações mecânicas



Envelhecimento em médio e longo prazo

Desafios da reciclagem de produtos multimateriais

- A reciclagem de filmes multicamadas e de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é mais difícil devido aos vários tipos de polímeros presentes em seus produtos (e aditivos) e à dificuldade em separá-los.

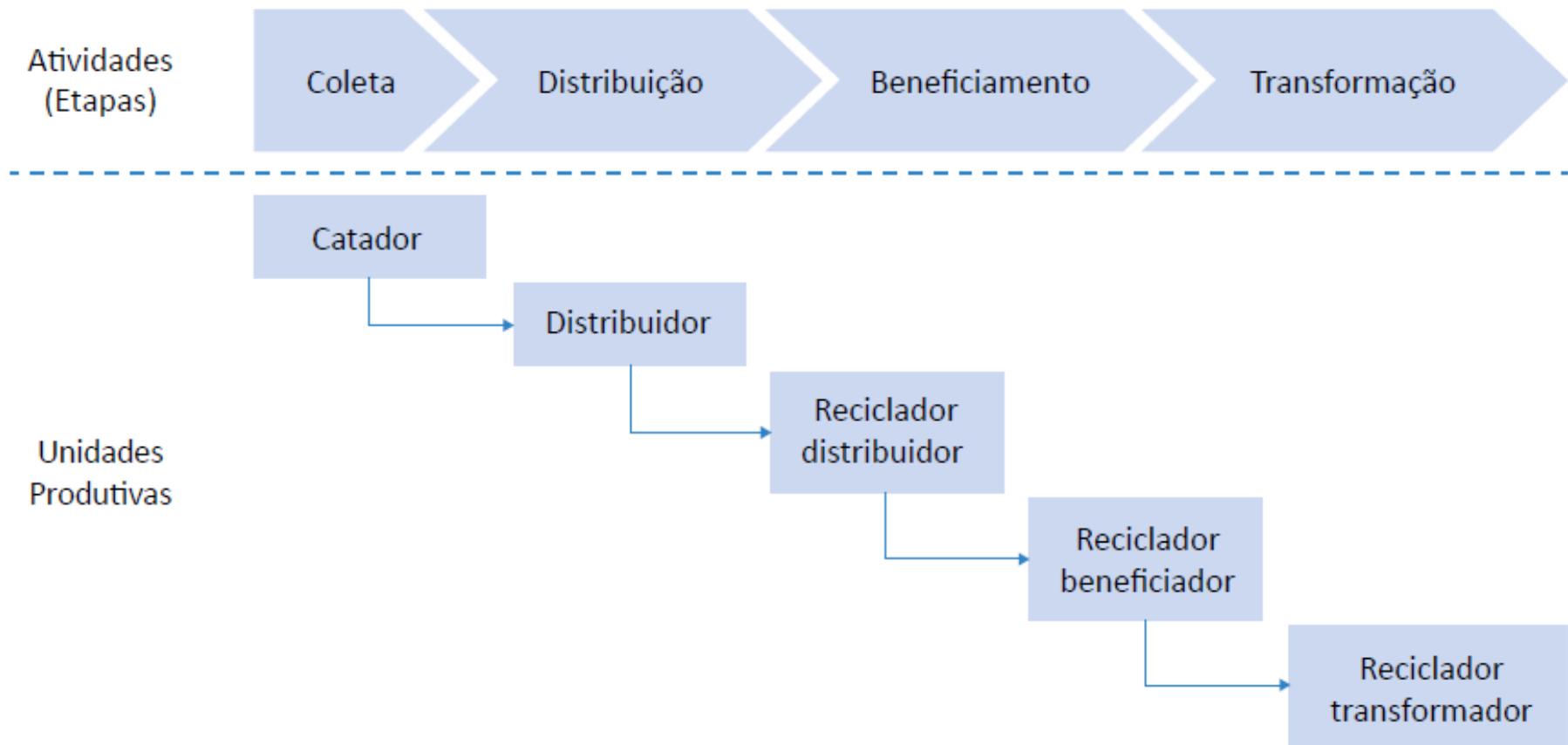
Sugestões para otimização da reciclagem de multimateriais

- A transformação de composições multicomponentes (multicamadas ou mistura de polímeros) em uma mistura multifásica compatível.
- O desenvolvimento de compatibilizantes para produtos multicomponentes.
- Embalagens compostas de homoplásticos simplificaria a reciclagem.
- Buscar aditivos que possam agregar propriedades ao polímero para reduzir a necessidade de multicamadas

Desafios - Design para facilitar a desmontagem

- Utilizar embalagens tipo refil. Ex. frascos de xampu, garrafas de PET...
- Alguns materiais não são separados devido à complexidade do design.
 - Deve-se projetar peças para incorporar partes facilmente removíveis para:
 - melhor gerenciamento de artigos pós-consumo por meio de fácil desmontagem e, conseqüentemente, realização de sua reciclagem.

GESTÃO DOS RESÍDUOS



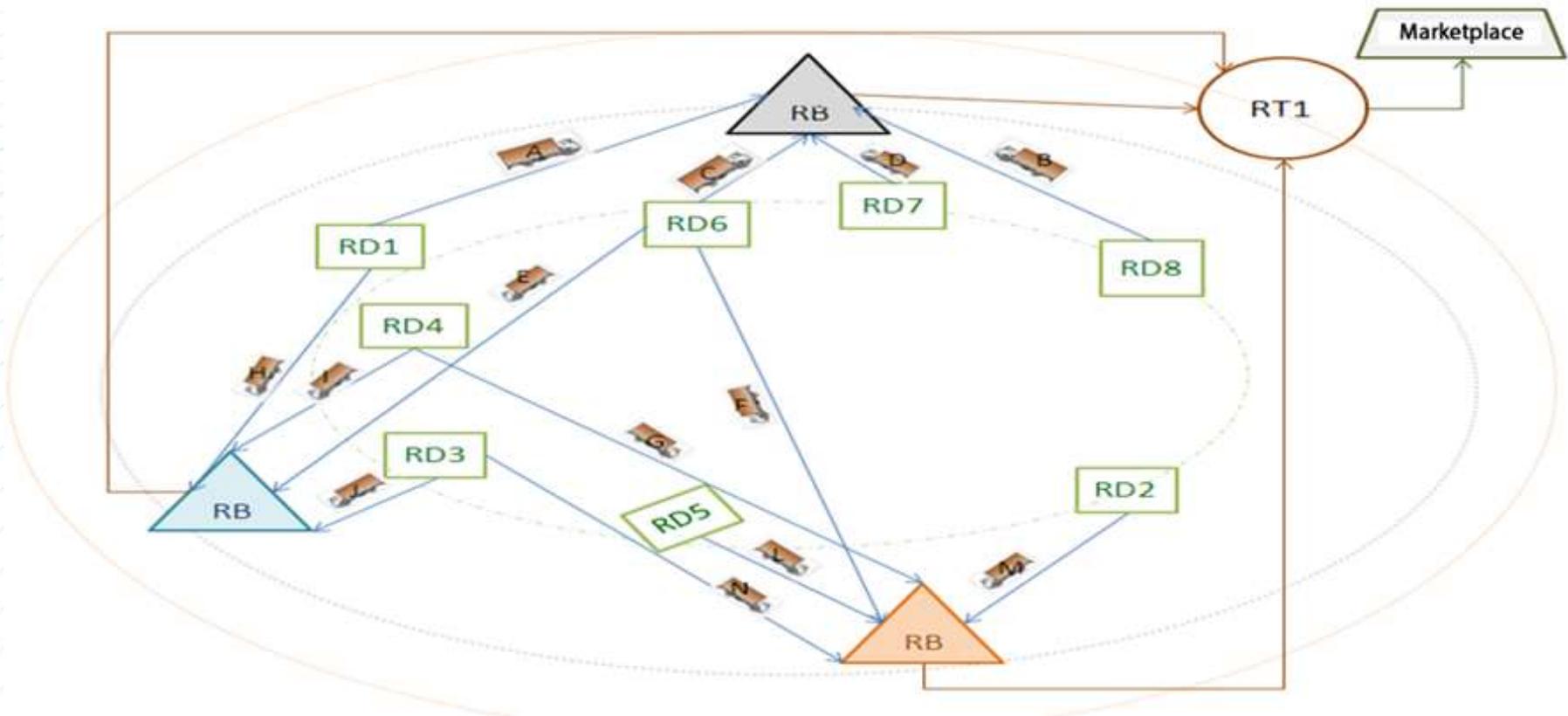
Fonte: R.D.Conceição, E.B.A.V.Pacheco, A cadeia de reciclagem de PET pós-consumo e as definições de suas etapas: um estudo de caso no Rio de Janeiro, RBCIAMB | n.39 | mar 2016 | 80-96

- Fez-se o mapeamento de fluxos de PET para a cadeia de reciclagem - identificados fornecedores e clientes no RJ.
- Observou-se no cenário atual não existe alguma otimização no fluxo do PET para a reciclagem:
 - Subutilização da capacidade de carga do caminhão.
 - Alta quilometragem percorrida.

Ex. estudo de proposta de avaliação em novo cenário para o PET no RJ

- Os novos fluxos foram condicionados:
 - à posição geográfica das unidades produtivas;
 - à rede comercial já formada entre as unidades produtivas;
 - Otimização do volume a ser transportado pelo caminhão dentro das rotas propostas.

O fluxo proposto mostrou uma redução de cerca de 50% nas emissões de CO_2 equiv/km percorrido, comparado ao do cenário atual.



Equipamento para beneficiamento de isopor



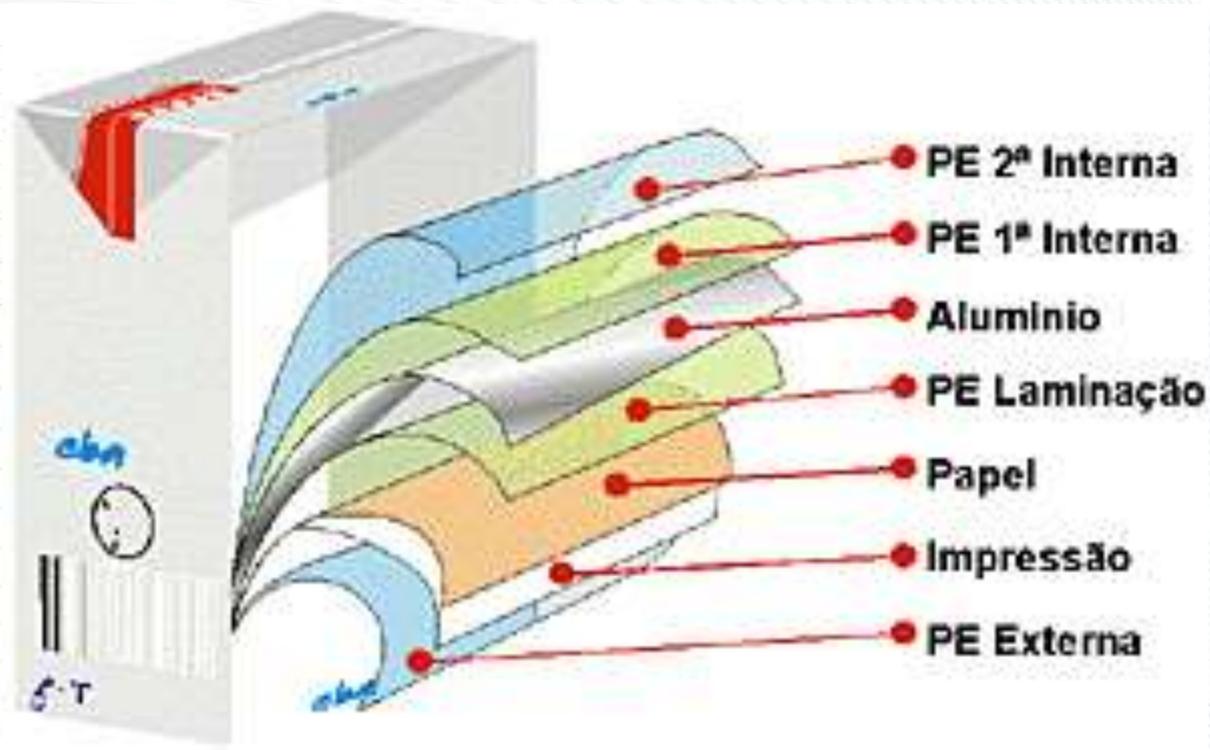
Fonte: www.plastivida.org.br



Fonte: seorreciclagem.com.com.br

Exemplos de reciclagem de materiais multimateriais

Embalagem longa vida



Estrutura da embalagem multicamada Tetra Pak[®]
Fonte: www.tetrapak.com.br acesso em abril 2013.

Hidrapulper



Fonte: recicloleta.com.br
<http://www.youtube.com/watch?v=gCgHmta2qsI>

Fabricação de telhas recicladas com plástico e alumínio



Fonte:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Reciclagem_de_embalagens_longa_vida

Considerações finais

Antes de executar a reciclagem:

- Design de produtos que facilitem a separação para a reciclagem.
- Projetar produtos e modelos de negócios que facilitem e incentivem a reutilização.
- Desenvolver soluções que aumentam a vida útil dos artigos de plástico.
- Desenvolver pesquisas para tornar os plásticos mais sustentáveis.
- Algumas formas de reciclagem permitem maior retenção de valor ao produto. Contudo, independente do processo de reciclagem, ela prolonga a vida útil do material e como resultado, de um modo geral, tem-se redução da quantidade de matéria-prima virgem, gasto de energia e emissões.

- Ideal: Fazer uma ACV.





Élen Vasques Pacheco

NERDES - IMA - UFRJ
Centro de Tecnologia
Bloco J - sala 120
55 (21) 3938-7224

elen@ima.ufrj.br

Caixa Postal 68.576
CEP 21945-970

INSTITUTO DE MACROMOLÉCULAS PROFESSORA ELOÍSA MANO

Cidade Universitária . Centro de Tecnologia . Bloco J . CP 68 525 . Rio de Janeiro . Brasil
CEP: 21945-970 . Fax: 55 0xx21 2270-1317 . Tel.: 55 0xx21 2562-7202 / 7032 . www.ima.ufrj.br

