

Impactos ambientais da produção de garrafas de polietileno numa indústria de Teresina-PI

Environmental impacts the production of polyethylene bottles in a Teresina-PI factory

Elaine Aparecida da Silva^{1*} e José Machado Moita Neto²

¹*Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina, PI, Brasil*

²*Departamento de Química, Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina, PI, Brasil*

**elaine@ufpi.edu.br*

Resumo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que possibilita a avaliação da performance ambiental de processos, produtos e serviços. Neste trabalho, a ACV é empregada para avaliar etapas do ciclo de vida de garrafas de polietileno. As matérias-primas (polietileno de alta densidade, polietileno de baixa densidade e pigmento) são adquiridas no pólo petroquímico de Recife, PE e transportadas a Teresina, PI por modal rodoviário, onde são transformadas pelo processo de moldagem por sopro. Depois disso, as garrafas são distribuídas para o município de Parnaíba, PI. Os dados primários foram coletados em uma indústria de transformação de plásticos de Teresina, PI e modelados no *software* SimaPro versão PhD 8.0.3.1 em conjunto com dados secundários obtidos nas bibliotecas Ecoinvent 3 e USLCI. A Avaliação de Impactos foi realizada segundo o modelo *ReCiPe Midpoint* (E). Observou-se que o processo produtivo na indústria de transformação, que demanda um elevado consumo de energia elétrica, se destacou na contribuição para as categorias de impacto; seguido pelo processo de transporte de matérias-primas e do produto final por conta da utilização do diesel. A melhoria do desempenho ambiental da garrafa plástica transformada em Teresina, PI pode ser alcançada com a implantação da eficiência energética na própria indústria.

Palavras-chave: *Avaliação do Ciclo de Vida, impactos ambientais, garrafas de polietileno.*

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that enables the evaluation of the environmental performance of processes, products and services. In this work, the LCA is used to assess stages of the life cycle of polyethylene bottles. The raw materials (high density polyethylene, low density polyethylene, and, pigment) are acquired in the petrochemical pole of Recife, PE and transported to Teresina, PI by road transport, where they are using the process of blow molding. After that, the bottles are distributed to the municipality of Parnaíba, PI. Primary data were collected in a plastic processing factory in Teresina, PI and modeled using SimaPro software version 8.0.3.1 PhD in conjunction with the information obtained from the Ecoinvent 3 and USLCI libraries. The Impact Assessment was carried out according to the model Recipe Midpoint (E). It was observed that the production process in the manufacturing factory, that demand a high consumption of electricity, stood out to contribution to impact categories; followed by transportation of raw materials and the final product due to the use of diesel fuel. Improving the environmental performance of plastic bottles made in Teresina, PI can be achieved with the implementation of energy efficiency in the factory itself.

Keywords: *Life Cycle Assessment, environmental impacts, polyethylene bottles.*

1. Introdução

Em função da crescente demanda pelos artefatos plásticos, motivada pela sua diversidade de aplicações (embalagens, construção civil, equipamentos elétricos e eletrônicos, entre outros), a atividade de transformação desse material tem se tornado comum nas cidades brasileiras. A cidade de Teresina, capital do Piauí, possui indústrias que transformam resinas poliméricas em produtos finais prontos para uso do

consumidor, tais como: sacos, sacolas, garrafas, produtos descartáveis e tubos utilizados em instalações hidrossanitárias.

Comumente, o plástico é visto como um dos vilões do meio ambiente, principalmente, por dois motivos: sua significativa representatividade na composição dos resíduos sólidos e por ser descartado, na maioria das vezes, de forma inadequada. Conforme o documento preliminar do Plano

Nacional dos Resíduos Sólidos, do total dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil, 13,5% corresponde a plásticos^[1].

Para saber a real dimensão dos impactos ambientais associados ao consumo dos plásticos, é preciso uma visão mais sistêmica que contemple toda a sua história. Por exemplo, a matéria-prima transformada no Piauí é adquirida em pólos petroquímicos localizados em outros estados do nordeste brasileiro e transportada por modal rodoviário, que é utilizado também na distribuição do produto final. Na indústria, ela é transformada, demandando o uso de outros insumos e energia. Depois de utilizado, o produto recebe uma disposição final que, no caso em questão, muitas vezes, é ambientalmente inadequado (lixões ou aterros controlados).

Assim, na história do produto, devem ser considerados aspectos relacionados à fabricação de transportes, à utilização de combustíveis, à construção de rodovias, ao consumo de energia, entre outras questões. Além disso, o consumo de água, a qualidade do efluente gerado no processo de transformação do plástico e o destino/disposição final dado ao produto pós-consumo são aspectos relevantes para avaliar a sustentabilidade ambiental.

A ferramenta que possibilita o conhecimento dos impactos ambientais em todas as fases do ciclo de vida dos produtos e serviços é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV ou *Life Cycle Assessment* (LCA), como é conhecida mundialmente, é definida como a “[...] compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida [...]”^[2]. Muitos nomes têm sido utilizados para esse conceito: eco-equilíbrio/equilíbrio ecológico (Alemanha, Suíça, Áustria e Japão), análise do perfil dos recursos e ambiente (Estados Unidos), perfil ambiental e avaliação do berço ao túmulo^[3].

Logo, a ACV pode ser aplicada para identificar os impactos ambientais associados a um produto/processo/serviço da fase de retirada de matéria-prima da natureza até a disposição final (berço ao túmulo). Sendo assim, os seus resultados indicam em que etapa específica do ciclo de vida pode ser feitas mudanças com a finalidade de evitar a transferência de impactos negativos para estágios subsequentes^[4]. Esta visão abrangente torna a ACV única no conjunto de ferramentas de gestão ambiental, pois sem ‘pensar’ o ciclo de vida, corre-se o risco de focar as questões ambientais que exigem atenção imediata e ignorar ou desvalorizar problemas que ocorrem em outro lugar ou em outra forma^[5].

Um trabalho precursor sobre a temática ACV, no Brasil, foi desenvolvido por Queiroz e Garcia, que avaliaram a performance ambiental da reciclagem de sacolas de polietileno, com ênfase no seu Inventário de Ciclo de Vida (ICV)^[6]. Neste trabalho, a ACV é utilizada para identificar os impactos associados à produção de garrafas de polietileno em Teresina-PI, bem como indicar oportunidades de melhorias no desempenho ambiental do processo.

2. Avaliação do Ciclo de Vida

As primeiras publicações científicas sobre ACV surgiram na década de 1990^[4]. No início, foram encontrados muitos obstáculos para a sua harmonização e padronização, o que

estimulou o interesse acadêmico neste método^[7]. Atualmente, a estrutura metodológica da ACV é descrita pela *International Organization for Standardization* (ISO), da série ISO 14000 e as suas similares brasileiras ABNT/ISO são:

- ABNT NBR ISO 14.040:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura;
- ABNT NBR ISO 14.044:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

Nos últimos vinte anos, foram publicados mais de oito mil artigos sobre o tema (“*life cycle assessment*”). Os periódicos que mais publicam artigos relacionados à ACV são: *International Journal of Life Cycle Assessment*, *Journal of Cleaner Production*, *Environmental Science Technology*, *Journal of Industrial Ecology and Resources*, *Conservation and Recycling*. Nos periódicos citados foram publicados 2.280 trabalhos entre janeiro de 1994 e dezembro de 2014^[8].

As aplicações da ACV envolvem o desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas e *marketing*^[2,9]. Além disso, pode auxiliar os consumidores na escolha de produtos/atividades sustentáveis e as instituições governamentais e não-governamentais na regulação e indução de práticas ambientalmente adequadas.

Mesmo não existindo obrigatoriedade para a sua aplicação, algumas empresas têm utilizado a mesma como uma estratégia de negócio para mercados que são cada vez mais exigentes quanto ao atendimento dos princípios da sustentabilidade. No Brasil, foi criada a Rede Empresarial Brasileira de Avaliação do Ciclo de Vida e nove empresas aderiram à iniciativa: Braskem, Danone, Embraer, GE, Grupo Boticário, Natura, Odebrecht, Oxiteno e Tetra Pak^[10].

Há quinze registros do termo ‘ciclo de vida’ na Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que é definido como a “[...] série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção das matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final [...]”^[11].

Muitas limitações são mencionadas em revisões críticas sobre ACV (comuns a outras ferramentas), mas várias delas tem potencial para ser corrigidas com melhores dados e métodos. As atividades atuais em relação a bancos de dados, garantia de qualidade, consistência e harmonização dos métodos tem contribuído para esse amadurecimento. No entanto, o desenvolvimento e a manutenção de bases de dados deve ser uma área prioritária na ACV^[4].

3. Cadeia Produtiva de Plásticos

O setor petroquímico é um importante segmento da indústria química nacional e está organizado em complexos industriais denominados pólos petroquímicos. Os quatro principais pólos petroquímicos brasileiros de exportação de polietileno estão localizados nos estados do Rio Grande do Sul (Pólo de Triunfo), São Paulo (Pólo de Capuava), Bahia (Pólo de Camaçari) e Rio de Janeiro (Pólo de Duque de Caxias)^[12,13].

A cadeia petroquímica é formada por três gerações baseada na fase de transformação das matérias-primas. Na primeira,

os produtores fracionam a nafta (subproduto do processo de refino do petróleo) ou o gás natural, transformando-os em olefinas, aromáticos, solventes e combustíveis. Nas unidades de segunda geração são produzidas resinas termoplásticas e intermediários. O setor de transformação de plásticos corresponde ao terceiro elo da cadeia, responsável pela transformação da resina termoplástica em produtos plásticos prontos para uso, tais como: embalagens em geral, utensílios domésticos, peças automotivas, entre outros^[13].

De acordo com a *Plastics Europe*^[14] os principais produtores mundiais de plástico, em 2013, foram a China (24,8%) e Europa (20%). Neste *ranking*, a América Latina aparece com 4,8%. Dados do Sindicato da Indústria de Resinas Plásticas (SIRESP)^[15] apontam o Brasil como o maior produtor de resinas plásticas da América do Sul e oitavo do mundo. Entretanto, conforme o SIRESP, o consumo per capita de produtos plásticos no Brasil é, aproximadamente, 23,2 kg/hab/ano; valor considerado pequeno quando comparado a outros mercados como Estados Unidos e Europa (93 kg/hab/ano).

Dentre os setores brasileiros que mais consomem produtos plásticos em sua composição estão construção civil (consome 16%), o setor de alimentos e bebidas (também consome 16%) e o setor de automóveis e autopeças (com 15% do consumo de produtos plásticos). Os principais tipos de resinas termoplásticas consumidas no Brasil são: polipropileno - PP, poli (cloreto de vinila) - PVC, polietileno de alta densidade - **PEAD**, polietileno de baixa densidade - **PEBD**, polietileno de baixa densidade linear - **PEBDL**, poli (etileno tereftalato) - PET, poliestireno - PS, etileno-acetato de vinila - EVA e poliestireno expandido - EPS^[16].

A indústria de transformação plástica brasileira é composta por um grande número de empresas. Segundo o Ministério do Trabalho e Emprego na Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) são 11.670 empresas instaladas. Dessas, 43,6% estão no estado de São Paulo e 11,1% no Rio Grande do Sul. No Piauí, são 34 empresas que correspondem a 0,3% das companhias de transformação de plásticos nacionais. A maioria, aproximadamente 93%, são micro ou pequenas empresas^[16].

4. Metodologia

A avaliação ambiental do processo de produção de garrafas de polietileno foi realizada conforme os requisitos previstos nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (2009) sobre Avaliação do Ciclo de Vida.

AACV foi desenvolvida em quatro fases. Na primeira, definiu-se o objetivo e o escopo do estudo. Na segunda fase, denominada Inventário do Ciclo de Vida (ICV), as entradas e as saídas associadas ao processo foram identificadas e quantificadas. Na terceira, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), os dados da fase anterior foram traduzidos em indicadores que refletem as pressões sobre o meio ambiente e a saúde humana. A interpretação corresponde à quarta etapa e deve ser baseada no objetivo e escopo definido^[2,9].

4.1 Definição de objetivo e escopo

- Objetivo – avaliar os processos de produção e transporte das matérias-primas e das garrafas de polietileno.

- Função do produto – acondicionamento de produto alimentício (iogurte).
- Unidade funcional – 950 garrafas de 500 mL de polietileno. Essa quantidade representa um ciclo de produção.
- Fluxo de referência – o valor do fluxo de referência é 19,1 kg, que corresponde ao peso conjunto das 950 garrafas.
- Desempenho do produto – garrafa não retornável de 500 mL.
- Qualidade dos dados – a cobertura temporal compreendeu os anos de 2011 e 2012. Quanto à cobertura geográfica, considerou-se a produção de resina termoplástica realizada no pólo petroquímico da região Nordeste e a transformação da resina em Teresina-PI.
- Sistema do produto – os processos elementares considerados neste estudo foram: produção das matérias-primas (PEAD, PEBD e pigmento), transporte das matérias-primas de Recife-PE a Teresina-PI, a transformação das matérias-primas em garrafas, através do processo de extrusão e moldagem por sopro, e a distribuição das garrafas para o município de Parnaíba-PI (Figura 1).
- Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e categorias de impacto - o método selecionado foi *ReCiPe Midpoint* (E) V1.10 / *World Recipe* E, para as seguintes categorias de impacto: eutrofização de corpos d'água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade de corpos d'água doce e ecotoxicidade marinha. Essas categorias também foram contempladas em outro estudo brasileiro de ACV de sacolas plásticas de polietileno^[6].
- Três aspectos relacionados à saúde e segurança na indústria de plásticos foram observados durante as visitas: equipamentos de proteção individual (EPI's), ruído no ambiente (máquinas em funcionamento) e calor nas proximidades das máquinas.

4.2 Inventário do Ciclo de Vida

Neste trabalho são utilizados dados primários e dados secundários. Para obtenção dos primeiros, foram realizadas visitas *in loco* em uma indústria que transforma polietileno em garrafas para acondicionamento de produtos alimentícios. Durante as visitas, foram coletadas informações como a origem das matérias-primas utilizadas na indústria e suas respectivas quantidades, as etapas do processo produtivo, o consumo de água e energia.

Neste estudo, considerou-se os dados de inventário relacionados aos processos de produção do PEAD, PEBD e pigmento e sobre as emissões dos transportes (em que é utilizado o modal rodoviário) semelhantes aos da Europa e dos Estados Unidos (gás butano), assim os dados secundários foram obtidos nas bibliotecas *Swiss Center of Life Cycle Inventories* (Ecoinvent 3) e *U.S. Life Cycle Inventory Database* (USLCI), disponíveis no banco de dados do *software* SimaPro versão PhD 8.0.3.14^[17], a razão disso

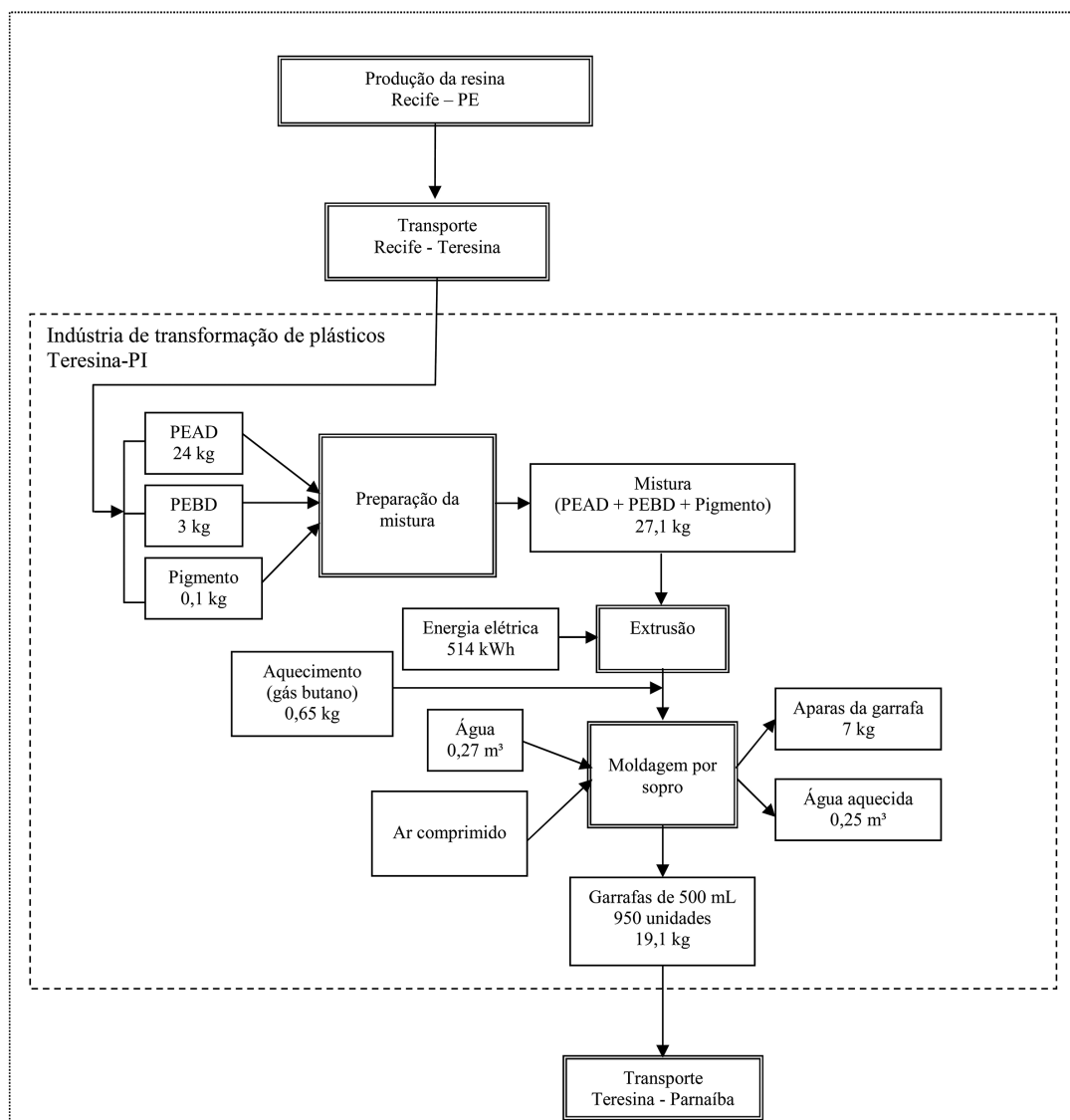


Figura 1. Sistema de produto referente a etapas do ciclo de vida de garrafas de polietileno.

é que os bancos de dados brasileiros de ICV agora é que começaram a ser formados^a.

Para o cálculo das emissões do transporte das matérias-primas às indústrias transformadoras de plásticos, considerou-se a distância entre as cidades de Recife-PE e Teresina-PI. Para o cálculo das emissões do transporte das garrafas para a indústria que realiza o envasamento

para posterior comercialização do produto alimentício, considerou-se a distância entre Teresina-PI e a cidade de Parnaíba-PI por ser o caso mais crítico de distribuição do produto (maior distância).

4.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

O método de AICV selecionado foi *ReCiPe Midpoint (E) V1.10 / World Recipe E*. Este método é bastante utilizado em estudos de ACV de diversos países.

O método *ReCiPe Midpoint (E)* considera dezoito categorias de impacto: ocupação de terras agricultáveis (ALO), mudanças climáticas (CC), depleção de recursos fósseis (FD), ecotoxicidade de corpos d'água doce (FET), eutrofização de corpos d'água doce (FE), toxicidade humana (HT), radiação ionizante (IR), ecotoxicidade marinha (MET), eutrofização marinha (ME), depleção da camada de ozônio (OD), formação de material particulado (PMF), formação de

^a O primeiro *workshop* visando alimentar uma base de dados brasileira aconteceu em Brasília, entre os dias 20 e 23 de janeiro de 2015. Vide link: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT. (2015). *Populating national LCA database: producing and upgrading datasets in accordance to international standards*. 1º Workshop Brasileiro de Adaptação de Inventário de Ciclo de Vida. Brasília: IBICT. Recuperado em 30 de janeiro de 2015, de <http://acv.ibict.br/programa-brasileiro-de-acv/publicacoes/programacao-do-i-workshop-de-adaptacao-de-inventarios-a-contexto-brasileiro>

oxidantes fotoquímicos (POF), acidificação terrestre (TA), ecotoxicidade terrestre (TET), ocupação do solo urbano (ULO), depleção de recursos hídricos (WD), transformação de áreas naturais (NLT) e depleção de metais (MRD)^[18].

Segundo a ABNT NBR ISO 14044, a normalização consiste cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência^[9]. As informações de referência e o cálculo da magnitude encontram-se documentados na página do ReCiPe^[19]. Particularmente, a normalização é analisada em detalhes no artigo de Sleeswijk et al.^[20], que fundamentaram os fatores de normalização utilizados no ReCiPe. O SimaPro, ao aplicar o *ReCiPe Midpoint (E) V1.10 / World Recipe E*, com a respectiva normalização, identificou as categorias de maior impacto para os processos descritos: eutrofização de corpos d'água doce, ecotoxicidade de corpos d'água doce, ecotoxicidade marinha e toxicidade humana.

5. Resultados

A indústria onde os dados foram coletados localiza-se na cidade de Teresina-PI e fabrica garrafas a partir de polietileno (PE) e do polipropileno (PP). Os tipos de garrafas, especificações de tamanho e matérias-primas utilizadas na produção estão indicados na Tabela 1. Cada tipo de garrafa é utilizada para acondicionar um produto específico, como água de côco, água mineral, iogurte, tempero, suco e mel.

As matérias primas utilizadas em maior quantidade na indústria são o PEAD, o PEBD e pigmentos, adquiridos mensalmente de uma empresa localizada em Recife-PE, nas seguintes quantidades: 6000 kg de PEAD, 200 kg de PEBD e, aproximadamente, 50 kg de pigmentos. O transporte das matérias-primas da empresa fornecedora até a unidade industrial transformadora de plástico em Teresina-PI ocorre em um veículo modelo Mercedes com capacidade de 15 t (caminhão-baú). A identificação do peso, capacidade, tipo e consumo de combustível é importante para os estudos de ACV.

A tecnologia utilizada na transformação das matérias-primas em garrafas é o processo de moldagem por sopro. Através desse processo, são confeccionadas peças ocas como frascos e garrafas, entre outros produtos termoplásticos vazados.

Na descrição do processo produtivo, são utilizadas informações quantitativas da garrafa tipo 3, embalagem mais vendida pela indústria e, por isso, escolhida para representar a unidade funcional neste estudo. A primeira etapa do processo, na indústria transformadora, consiste na mistura manual das matérias-primas nas seguintes quantidades: 24 kg de PEAD, 3 kg de PEBD e 100 g de pigmento. Depois de misturadas homogeneamente, as matérias-primas são colocadas na extrusora, onde são compactadas até formar um fundido homogêneo que é conduzido para um molde com duas partes móveis constituídas de ligas de alumínio^b, onde é injetado ar para que a massa plástica fique acomodada nas paredes. Depois disso, inicia-se o resfriamento através de choque térmico entre a massa quente e a parede fria do molde. Por fim, o molde é aberto e a garrafa é retirada. Os dados numéricos de entrada e saída constantes na Figura 1 não

^b No interior do molde de alumínio circula água fria.

espelham, rigorosamente, um balanço de massa; pois foram baseados em estimativas fornecidas pelo gerente de produção.

A indústria visitada possui cinco máquinas pneumáticas de moldagem por sopro em que são produzidas diariamente 3.800 garrafas do tipo 3. Nesse processo, são gerados também 28 kg aparas, tanto de garrafas que apresentam alguma falha de produção, quanto de rebarbas/sobras. Uma representação esquemática dos fluxos de entradas e saídas na indústria transformadora pode ser observada na Figura 2.

As aparas do procedimento descrito e a água utilizada no resfriamento do molde retornam ao processo novamente. As aparas retornam depois de passarem pela etapa de trituração em um moinho. Depois, são misturadas às matérias-primas virgens na proporção de 1:1. A água é encaminhada para caixas d'água de 1000 L interligadas às máquinas por canos de PVC. A entrada de água quente fica a 2 m de altura da caixa d'água; a sua queda, que possibilita o contato com as correntes de ar e, também, a utilização de um ventilador favorecem o resfriamento da água, que é retirada da parte inferior da caixa.

As caixas d'água são lavadas duas vezes por mês para a retirada de resíduos oriundos do sistema e do lodo acumulado e depositado no seu fundo. A água é utilizada por, no máximo, quinze dias. Depois disso, é substituída. Os resíduos, lodo e água descartada são lançados nos corpos d'água sem passar por nenhum tratamento prévio.

Os produtos são vendidos para os estados do Maranhão e Piauí. Neste trabalho, utilizou-se como referência na modelagem o município de Parnaíba-PI, por ser um importante centro consumidor das garrafas de polietileno e o mais distante de Teresina-PI, dentre os municípios para os quais as garrafas são vendidas.

Tabela 1. Tipos e especificações de garrafas de plásticos.

Produto	Tamanho (mL)	Matérias-primas
Garrafa – tipo 1	200	PEAD, PEBD e pigmento branco
Garrafa – tipo 2	200	PEAD, PEBD e pigmento róseo
Garrafa – tipo 3	500	PEAD, PEBD e pigmento róseo
Garrafa – tipo 4	300	PEAD e PEBD
Garrafa – tipo 5	50	PP
Garrafa – tipo 6	120	PP
Garrafa – tipo 7	300	PP
Garrafa – tipo 8	500	PP

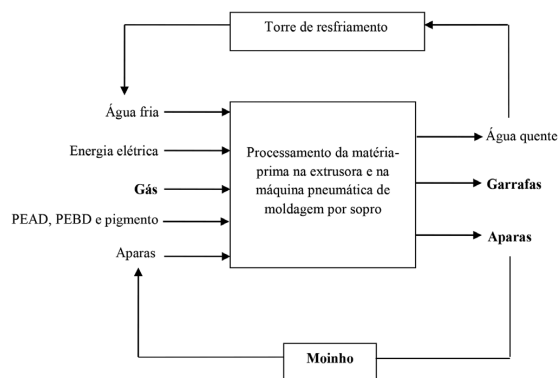


Figura 2. Representação esquemática dos fluxos na indústria de plásticos.

A expedição dos produtos é feita por caminhões de redes distribuidoras dos estados do Piauí e do Maranhão, com exceção dos produtos distribuídos em Teresina-PI e Timon-MA, que é feita em um carro de passeio de propriedade do responsável legal pela indústria ou pelos próprios clientes, movidos à óleo diesel.

Para distribuição, as garrafas são enfardadas em sacos de polietileno, produzidos em outra indústria de Teresina-PI. Em média, a indústria pesquisada consome acima de 3.000 sacos por mês. Cada saco tem capacidade para 600, 800 ou 1000 garrafas, dependendo do seu tamanho. As tampas que acompanham as garrafas são do tipo rosqueada e são adquiridas em uma indústria fora do estado. O processo de rotulagem, para identificação do produto a ser adicionado à garrafa, não é feito na indústria visitada. Os produtos (sacos de polietileno e tampas) e processo (rotulagem) realizados em outras indústrias não foram considerados na ACV deste trabalho.

O consumo de água e energia necessárias para o desenvolvimento dos processos na indústria de transformação é de 30 m³/mês e 5500 kWh/mês. As fontes energéticas da indústria são a energia elétrica, gás butano e o combustível para o transporte. A energia elétrica é fornecida pela Eletrobrás distribuição Piauí e, apresenta especificações de instalação da classe comercial, subclasse 05 e do tipo de ligação trifásica, com uma tensão ponto entrega de 380 V, 348 V e 396 V, respectivamente normal, mínima e máxima.

O consumo da energia elétrica é atribuído aos equipamentos utilizados para o processo industrial, como: máquinas pneumáticas de moldagem por sopro (incluindo extrusora) e compressores. Outros equipamentos em uso são ar condicionados, ventiladores e computadores. A utilização do gás butano ou gás liquefeito do petróleo (GLP) é uma adaptação feita na própria indústria com a finalidade de diminuir o consumo de energia elétrica. Assim, é utilizado um botijão de 13 kg em cada máquina que, para a produção da garrafa tipo 3, dura cinco dias.

6. Saúde e Segurança na Indústria de Transformação de Plásticos

Alguns aspectos relacionados à saúde e segurança na indústria de plásticos pesquisada merecem atenção, como a não utilização dos EPI's pelos funcionários; os níveis de ruído no ambiente, promovidos pelas máquinas em funcionamento, e ainda o calor excessivo a que estão submetidos os funcionários da indústria pela proximidade das máquinas e a inexistência de mecanismos de proteção.

É imperativo que a indústria informe com mais veemência os seus funcionários sobre a importância da utilização adequada dos EPI's e utilize mecanismos de proteção, como mantas térmicas que, além de reduzir o consumo de energia elétrica, protegem o trabalhador de queimaduras e exposição ao calor.

7. Discussão

Nos últimos cinco anos tem crescido a utilização da ACV na área de polímeros, como exemplo, pode-se observar o trabalho de Czaplicka-Kolarz, Burchart-Korol e Korol, que

utilizam o referido método para avaliar diferentes polímeros: PE, PP, PVC, PS e PET^[21]. Contudo, as aplicações são voltadas, principalmente, para biopolímeros e biocompósitos^[22-26]; comparação destes com petroquímicos^[27,28]; as vantagens e as desvantagens da reciclagem^[6,29-32]. Além disso, há trabalhos de escala laboratorial^[27] ou de abordagem restrita, usando apenas um indicador (exemplo: pegada de carbono)^[31,33,34].

Estudos de ACV, com dados obtidos diretamente na indústria, são raros devido à sensibilidade destas informações para a própria empresa; e mesmo quando publicados, as informações fornecidas são insuficientes para a reprodução ou comparação com o trabalho aqui desenvolvido.

Foram analisados os processos de obtenção das matérias-primas utilizadas na produção das garrafas (PEAD, PEBD e pigmentos); o seu transporte entre Recife-PE e Teresina-PI; o processamento 1, na indústria de transformação, que corresponde à mistura das matérias-primas e a sua extrusão; o processamento 2, etapa em que as matérias-primas passam pelo processo de moldagem por sopro e, por último, o transporte das garrafas para o centro consumidor de Parnaíba-PI. Na modelagem do processo industrial estudado, foi considerada a primeira produção (sem utilização das aparas e reaproveitamento de água).

A utilização do *ReCiPe Midpoint (E) V1.10 / World Recipe E* permitiu visualizar a contribuição de cada processo elementar avaliado (ou etapas do ciclo de vida da garrafa de polietileno) para as categorias de impacto contempladas no método (Tabela 2).

O processamento 1 (mistura e extrusão das resinas poliméricas e pigmento) teve destaque em quase todas as categorias de impacto por causa do elevado consumo de energia elétrica do processo de extrusão. Somente na categoria depleção de recursos fósseis (FD) é que a produção das matérias-primas teve maior destaque (64,3%), pois os derivados de petróleo (etileno e propileno) são fontes de recursos naturais não renováveis.

O transporte das matérias-primas de Recife-PE a Teresina-PI e a distribuição das garrafas para os centros consumidores em Parnaíba-PI tem efeito mais acentuado na categoria de ocupação do solo urbano (ULO). Em conjunto, esses processos elementares respondem por 43,9% dos impactos ambientais associados a atividades como a construção/utilização de estradas e rodovias (desflorestamento, fragmentação de *habitats*, extinção de espécies, entre outros), tendo em vista que esse material é transportado por modal rodoviário.

As contribuições da produção de matérias-primas e dos processamentos na indústria de transformação são representativas (95%) para a categoria mudanças climáticas (CC). O transporte dos insumos e das garrafas para os centros consumidores contribui em 5% para esta mesma categoria de impacto. Blenis^[34] utilizou a ACV para identificar a pegada de carbono de alguns produtos e constatou que, na maioria dos cenários de pegada de carbono, os fabricantes vão descobrir que o maior componente das emissões geradas vem de duas fontes: o consumo primário de energia elétrica e o transporte de mercadorias.

Após normalizar a contribuição de cada categoria, segundo valores de referência do método *ReCiPe Midpoint (E)*, emergiram como mais importantes as categorias ecotoxicidade marinha (2,13), toxicidade humana (1,41),

Tabela 2. Contribuição dos impactos potenciais do sistema de produto estudado.

Categoria de impacto	Unidade	Total	Produção das matérias-primas	Proces. 1 (mistura e extrusão)	Proces. 2 (moldagem por sopro)	Transporte (Rec-Ter)	Transporte (Ter-Par)
CC	kg CO ₂ eq	180 100%	49,3 27,4%	122 67,7%	0,121 0,06%	7,1 3,95%	1,54 0,85%
OD	kg CFC-11 eq	4,96E-6 100%	2,85E-7 5,75%	4,06E-6 81,8%	4,25E-9 0,08%	5,04E-7 10,2%	1,09E-7 2,2%
TA	kg SO ₂ eq	0,695 100%	0,203 29,3%	0,458 66%	0,000809 0,11%	0,0262 3,77%	0,00567 0,81%
FE	kg P eq	0,0416 100%	0,00137 3,28%	0,0396 95%	4,42E-5 0,10%	0,000536 1,29%	0,000116 0,27%
ME	kg N eq	0,0384 100%	0,00487 12,7%	0,0321 83,7%	2,49E-5 0,06%	0,00113 2,94%	0,000245 0,63%
HT	kg 1,4-DB eq	2,05E3 100%	64,9 3,16%	1,95E3 95%	1,74 0,08%	29,2 1,42%	6,33 0,30%
POF	kg NMVOC	0,608 100%	0,263 43,3%	0,304 49,9%	0,000434 0,07%	0,0335 5,51%	0,00727 1,2%
PMF	kg PM10 eq	0,291 100%	0,0638 22%	0,213 73,3%	0,00031 0,10%	0,0111 3,83%	0,00242 0,83%
TET	kg 1,4-DB eq	0,277 100%	0,00445 1,61%	0,26 94%	6,62E-5 0,02%	0,01 3,62%	0,00217 0,78%
FET	kg 1,4-DB eq	1,31 100%	0,0802 6,13%	1,18 90,3%	0,00325 0,24%	0,0354 2,71%	0,00767 0,58%
MET	kg 1,4-DB eq	1,44E3 100%	63,5 4,41%	1,34E3 93,1%	1,83 0,12%	28,1 1,95%	6,1 0,42%
IR	kBq U235 eq	19,1 100%	0,349 1,83%	18 94,4%	0,0214 0,11%	0,58 3,04%	0,126 0,65%
ALO	m ² a	17,5 100%	0,0953 0,54%	17,2 98,6%	0,00602 0,03%	0,114 0,65%	0,0248 0,14%
ULO	m ² a	1,16 100%	0,174 15,1%	0,47 40,6%	0,00465 0,40%	0,418 36,1%	0,0905 7,83%
NLT	m ²	0,121 100%	0,000972 0,8%	0,118 97%	3,25E-5 0,02%	0,00219 1,8%	0,000474 0,39%
WD	m ³	3,89E3 100%	4,92 0,12%	3,88E3 99,7%	0,76 0,01%	3,88 0,09%	0,842 0,02%
MRD	kg Fe eq	10,4 100%	0,256 2,47%	9,71 93,7%	0,00681 0,06%	0,323 3,11%	0,07 0,67%
FD	kg oil eq	68,4 100%	44 64,3%	21,3 31,1%	0,0299 0,04%	2,54 3,71%	0,55 0,80%

Climate Change (CC), Ozone Depletion (OD), Terrestrial Acidification (TA), Freshwater Eutrophication (FE), Marine Eutrophication (ME), Human Toxicity (HT), Photochemical Oxidant Formation (POF), Particulate Matter Formation (PMF), Terrestrial Ecotoxicity (TET), Freshwater Ecotoxicity (FET), Marine Ecotoxicity (MET), Ionising Radiation (IR), Agricultural Land Occupation (ALO), Urban Land Occupation (ULO), Natural Land Transformation (NLT), Water Depletion (WD), Metal Depletion (MRD), Fossil Depletion (FD).

ecotoxicidade de corpos d'água doce (0,28) e eutrofização de corpos d'água doce (0,14).

A contribuição do processamento 1 para as categorias eutrofização dos corpos d'água doce e toxicidade humana é acima de 95%, seguida da etapa produção das matérias-primas (3,2%) e do transporte das mesmas do pólo petroquímico em Recife-PE para Teresina-PI (1,4%).

A partir dos resultados, pode-se inferir que são três os aspectos que determinam os impactos ambientais negativos associados à atividade de transformação do polietileno e transporte das matérias-primas e produto acabado: 1) utilização de etileno e propileno (derivados do petróleo) na produção de resinas termoplásticas; 2) utilização do diesel (derivado do petróleo) no transporte das matérias-primas e na distribuição do produto final e 3) o uso intensivo de energia elétrica.

A utilização de derivados do petróleo (etileno, propileno, diesel e etc) implica na extração e transporte do petróleo bruto às refinarias, bem como nos processos correspondentes para transformação e obtenção do produto desejado. Atividades que estão associadas a riscos de acidentes que podem resultar na contaminação do solo e/ou corpos d'água, desequilíbrio no ambiente pela morte de espécies; além da emissão de gases que poluem a atmosfera e trazem prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana.

No que se refere ao uso intensivo de energia elétrica, é importante considerar a diversidade de fontes existentes na matriz energética brasileira. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE^[35], no Balanço Energético Nacional (BEN) 2014: ano base 2013, a oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil é: hidráulica (70,6%)

– inclui importação de eletricidade, gás natural (11,3%), biomassa (7,6%) – inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações, derivados de petróleo (4,4%), carvão e derivados (2,6%) – inclui gás de coqueria, nuclear (2,4%) e eólica (1,1%). Os impactos correspondentes à cada uma dessas fontes incidem em maior ou menor grau sobre as categorias de impacto analisadas.

Além disso, há impactos ambientais nas fases de distribuição e comercialização da energia. Conforme a Eletrobrás – Distribuição Piauí^[36], todos os empreendimentos executados pela Companhia Energética do Piauí são licenciados pelos órgãos ambientais competentes. Nesse procedimento, são requeridas, além das licenças ambientais, a autorização de supressão de vegetação.

8. Considerações Finais

Para efeito de interpretação, pode-se agrupar os processos elementares analisados em três etapas: 1) produção de matéria-prima; 2) processo produtivo na indústria de transformação e 3) transporte da matéria-prima e da garrafa. Dessas etapas, o processo produtivo foi o que mais se destacou na contribuição para as dezoito categorias de impacto cobertas pelo *ReCiPe Midpoint* (E) e, em particular, nas categorias que se revelaram mais importantes após a normalização.

Deste modo, a principal intervenção que pode trazer melhorias ambientais no sistema de produto estudado, corresponde a mudanças na indústria de transformação de polietileno, destacando-se a eficiência energética. Isso porque o consumo de energia elétrica é o impacto mais significativo do ponto de vista ambiental para o produto plástico transformado em Teresina-PI.

O fato da produção da matéria-prima não causar impacto significativo, quando comparado ao desenvolvimento do processo produtivo, indica que pouco ganho ambiental é atingido com a reciclagem mecânica do polietileno. Além de demandar consumo adicional de energia elétrica para os processos de lavagem, secagem e extrusão para obtenção da resina reciclada e, posteriormente, nova extrusão para obtenção do produto final, há redução no mercado do produto final; pois o reciclado tem limitações de uso, como na indústria alimentícia.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa (471500/2012-7).

10. Referências

1. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR. (2012). *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Recuperado em 28 de janeiro de 2015, de http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657
2. Associação Brasileira de Norma Técnica – ABNT. (2009). *ABNT NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: ABNT.
3. Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment

- (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>.
4. Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>. PMID:19716647.
5. Curran, M. A. (2013). Life cycle assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>.
6. Queiroz, G. C., & Garcia, E. E. C. (2010). Reciclagem de sacolas plásticas de polietileno em termos de Inventário de Ciclo de Vida. *Polímeros*, 20(5), 401-406. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282011005000003>.
7. Russell, A., Ekvall, T., & Baumann, H. (2005). Life cycle assessment: introduction and overview. *Journal of Cleaner Production*, 12(13-14), 1207-1210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.05.008>.
8. Web of Science. (2015). Recuperado em 26 de janeiro de 2015, de <http://pcs.isiknowledge.com/analyze/ra.cgi>
9. Associação Brasileira de Norma Técnica – ABNT. (2009). *ABNT NBR 14044:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: ABNT.
10. Portal Brasil. (2015). *Ciclo de vida dos produtos pode amenizar impactos ambientais*. Recuperado em 28 de janeiro de 2015, de <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2013/11/ciclo-de-vida-dos-produtos-pode-amenizar-os-impactos-ambientais>
11. Brasil. (2010, agosto 2). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010). *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*.
12. AliceWeb2. (2015). Recuperado em 12 de janeiro de 2015, de <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>
13. Braskem. (2015). Recuperado em 17 de janeiro de 2015, de <http://braskem.riweb.com.br/show.aspx?idCanal=YlvXIS7BgoLxL7WvVwvP5A==>
14. Plastics Europe. (2015). *Plastics – the Facts 2014/2015*. Recuperado em 26 de janeiro de 2015, de <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-20142015.aspx?FoIID=2>
15. Sindicato da Indústria de Resinas Plásticas – SIRESP. (2015). *Uma indústria moderna e competitiva*. Recuperado em 16 de janeiro de 2015, de <http://www.siresp.org.br/industria/industria.php>
16. Associação Brasileira da Indústria do Plástico – ABIPLAST. (2013). *PERFIL 2013: Indústria brasileira de transformação de material plástico*. Recuperado em 29 de janeiro de 2015, de http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/perfil2013_abiplast_final_web.pdf
17. Pré Consultants. (2014). *SimaPro. Versão PhD 8.0.3.14*.
18. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Zelm, R. V. (2013). *ReCiPe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Recuperado em 29 de janeiro de 2015, de http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf?attredirects=0
19. ReCiPe. (2015). Recuperado em 2 de fevereiro de 2015, de <http://www.lcia-recipe.net/>
20. Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., & Huijbregts, M. A. J. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *The Science of the Total Environment*, 390(1), 227-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.040>. PMID:17996278.

21. Czaplicka-Kolarz, K., Burchart-Korol, D., & Korol, J. (2013). Application of life cycle assessment and exergy to environmental evaluation of selected polymers. *Polimery*, 58(7/8), 605-609. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.605>.
22. Hottle, T. A., Bilec, M. M., & Landis, A. E. (2013). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymer Degradation & Stability*, 98(9), 1898-1907. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.06.016>.
23. Czaplicka-Kolarz, K., Burchart-Korol, D., & Korol, J. (2013). Environmental assessment of biocomposites based on LCA. *Polimery*, 58(6), 476-481. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.476>.
24. Colwill, J. A., Wright, E. I., & Rahimifard, S. (2012). A holistic approach to design support for bio-polymer based packaging. *Journal of Polymers and The Environment*, 20(4), 1112-1123. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-012-0545-z>.
25. Piemonte, V. (2011). Bioplastic wastes: the best final disposition for energy saving. *Journal of Polymers and The Environment*, 19(4), 988-994. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-011-0343-z>.
26. Vilaplana, F., Stromberg, E., & Karlsson, S. (2010). Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. *Polymer Degradation & Stability*, 95(11), 2147-2161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2010.07.016>.
27. McDevitt, J. E., & Grigsby, W. J. (2014). Life cycle assessment of bio- and petro-chemical adhesives used in fiberboard production. *Journal of Polymers and The Environment*, 22(4), 537-544. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-014-0677-4>.
28. Guo, M., & Murphy, R. J. (2012). Is there a generic environmental advantage for starch-PVOH biopolymers over petrochemical polymers? *Journal of Polymers and The Environment*, 20(4), 976-990. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-012-0489-3>.
29. Piemonte, V., Sabatini, S., & Gironi, F. (2013). Chemical recycling of PLA: a great opportunity towards the sustainable development? *Journal of Polymers and The Environment*, 21(3), 640-647. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-013-0608-9>.
30. Rajendran, S., Hodzic, A., Scelsi, L., Hayes, S., Soutis, C., AlMa'adeed, M., & Kahraman, R. (2013). Plastics recycling: insights into life cycle impact assessment methods. *Plastics Rubber and Composites*, 42(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1179/1743289812Y.0000000002>.
31. Muthu, S. S., Li, Y., Hu, J. Y., & Ze, L. (2012). Carbon footprint reduction in the textile process chain: recycling of textile materials. *Fibers and Polymers*, 13(8), 1065-1070. <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-012-1065-0>.
32. Bourmaud, A., Le Duigou, A., & Baley, C. (2011). What is the technical and environmental interest in reusing a recycled polypropylene-hemp fibre composite? *Polymer Degradation & Stability*, 96(10), 1732-1739. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2011.08.003>.
33. Muthu, S. S., Ng, F. S. F., Li, Y., Hui, P. C. L., & Guo, Y. P. (2013). Carbon and eco-footprints of adult incontinence products. *Fibers and Polymers*, 14(10), 1776-1781. <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-013-1776-x>.
34. Blenis, S. (2009). *Carbon footprints - What are they and what good are they?* In *Proceedings of the Global Plastics Environmental Conference* (pp. 2031-2066). Orlando: Society of Plastics Engineers.
35. Brasil. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (2014). *Balanço Energético Nacional: ano base 2013* (Relatório Final). Recuperado em 2 de fevereiro de 2015, de https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf
36. Eletrobrás.(2013). *Política Ambiental das Empresas Eletrobras*. Recuperado em 17 de janeiro de 2015, de http://www.eletobraspiaui.com/download/201310/CEPISA24_8c08551521.pdf

Enviado: Out. 01, 2014
Revisado: Fev. 03, 2015
Aceito: Mar. 20, 2015