

Artigo Técnico

Estudo sobre reciclagem de lâmpadas fluorescentes

Study about fluorescent lamp recycling

Danniele Miranda Bacila¹, Klaus Fischer², Mônica Beatriz Kolicheski³

RESUMO

Lâmpadas fluorescentes (LF) contêm mercúrio em sua composição, um metal pesado que pode causar danos à saúde e ao meio ambiente. As LF são amplamente consumidas no Brasil, porém o descarte correto de LF usadas não é amplamente divulgado e os índices de reciclagem são baixos. O objetivo deste estudo foi demonstrar a relevância do descarte adequado, avaliar as tecnologias de reciclagem e a destinação dos materiais, por meio de estudo comparativo entre Brasil e Alemanha. Através de visitas a recicladoras e análise das tecnologias adotadas nos dois países, foi verificado que no Brasil o vidro é destinado à indústria de cerâmica, enquanto que na Alemanha é destinado à fabricação de tubos para LF. Além disso, foi observado que o mercúrio apresenta diversas possibilidades de uso. Um ponto a ser explorado nos dois países, e de grande potencial para reciclagem, é a recuperação de terras raras do pó fosfórico presente nas LF. Tanto Brasil como Alemanha possuem oportunidades de melhoria na logística reversa de LF, por meio da qual se torna possível elevar os índices de reciclagem e reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de LF usadas.

Palavras-chave: lâmpadas fluorescentes; mercúrio; reciclagem; logística reversa.

ABSTRACT

Fluorescent lamps (FL) contain mercury in their composition, a heavy metal that can be a health hazard and damage the environment. The FL are widely consumed in Brazil, although the right disposal of FL is not well known and the recycling rate is low. This study objective is to demonstrate the importance of proper disposal and to evaluate recycling technologies and material destination through a comparative study between Brazil and Germany. In visits to recycling companies in both countries and analyzing the used technologies, it was verified that in Brazil the glass is sent to ceramics industry, while in Germany it is mainly sent for the manufacture of FL tubes. Also, the mercury has several applications. A point to be explored in both countries, with great recycling potential, is the recovery of the rare earth from phosphoric powder from FL. Both Brazil and Germany have improvement opportunities in the reverse logistics of FL, through which it becomes possible to increase recycling rates and reduce the environmental impact caused by the inappropriate disposal of used FL.

Keywords: fluorescent lamps; mercury; recycling; reverse logistics.

INTRODUÇÃO

O risco ambiental de contaminação de uma única lâmpada fluorescente pode ser dito como quase nulo. Entretanto, levando em consideração que no Brasil existe uma geração anual de resíduos de lâmpadas fluorescentes (LF) estimada em 206 milhões de unidades e que o uso vem aumentando significativamente, principalmente, devido à política de banimento das lâmpadas incandescentes, tem-se como consequência o surgimento de uma problemática ambiental relacionada à destinação pós-consumo desses produtos. Segundo Bastos (2011), a regulamentação da Lei de Eficiência Energética, através da Portaria Interministerial nº 1.007, induz ao banimento gradativo das lâmpadas incandescentes e a substituição pelas LF

compactas, as quais são mais eficientes do ponto de vista energético. Entretanto, um diferencial entre as lâmpadas incandescentes e fluorescentes é o teor de mercúrio, existente somente nas fluorescentes. Assim, são importantes os cuidados no manuseio e destinação final do resíduo, devido aos impactos socioambientais que podem ocorrer pelo descarte inadequado. A quantidade de LF geradas por essa substituição já demanda um sistema de logística reversa, bem como uma política para promover a orientação da população quanto aos riscos gerados pela exposição ao mercúrio. De acordo com Hu e Cheng (2012), caso milhões de lâmpadas sejam quebradas, a massa cumulativa de mercúrio pode ser significativa. Além disso, deve-se considerar os baixos índices de reciclagem atuais.

¹Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e Universidade de Stuttgart - Curitiba (PR), Brasil.

²Doutor em Engenharia Química pela Universidade de Stuttgart - Alemanha. Coordenador do *The International Solid Waste Association (ISWA)*. Professor de resíduos sólidos na Universidade de Stuttgart. Professor do Mestrado em Meio Ambiente da UFPR - Curitiba (PR), Brasil.

³Doutora em Engenharia pelo Programa Interdisciplinar de Pós Graduação da UFPR (PIPE). Professora do curso de Engenharia Química da UFPR - Curitiba (PR), Brasil.

Endereço para correspondência: Danniele Miranda Bacila - Rua José Ferreira Pinheiro, 202 - 80320-140 - Curitiba (PR), Brasil - E-mail: dannibacila@yahoo.com.br

Recebido: 26/06/12 - **Aceito:** 05/02/14 - **Reg. ABES:** 442

Segundo Polanco (2007), o mercúrio é um componente essencial para o funcionamento das LF, e está relacionado à longa vida útil e à eficiência energética. A quantidade desse metal pesado é medida geralmente em miligramas e tem variação por tipo de lâmpada e fabricante.

Os impactos ambientais associados às LF ocorrem principalmente pela presença do mercúrio na sua composição. Segundo Pawlowski (2011), o mercúrio representa uma ameaça para o meio ambiente global, pois é um poluente tóxico, persistente e bioacumulativo, o qual está se dispersando continuamente através da superfície terrestre. Por ser persistente, não pode ser eliminado e permanece no meio ambiente.

O mercúrio contido em LF pode ser liberado para as matrizes solo, ar e água. As quantidades de mercúrio liberadas nos EUA, no ano de 2000, foi de 41 t liberadas para o ar, 0,8 t para a água e 106 t para a matriz solo (CAIN *et al.*, 2007). Outro estudo demonstrou que também pode ocorrer a conversão de mercúrio para espécies mais tóxicas desse elemento em resíduos de lâmpadas (DURÃO JÚNIOR & WINDMÖLLER, 2008).

A reciclagem das lâmpadas que apresentam mercúrio é o processo mais eficaz para a minimização dos impactos ambientais, pois estas são 99% recicláveis após o uso. Para que essa reciclagem possa acontecer em grande escala e para que sejam seguidas as legislações federais publicadas em 2010 no Brasil, deve-se utilizar do sistema de logística reversa, visando recapturar o valor dos materiais e oferecer um destino ecologicamente correto.

Estudo realizado em São Paulo demonstrou que a maioria dos consumidores descarta as LF no lixo orgânico, mas considera o local correto para disposição os postos de reciclagem e de coleta seletiva, sendo uma grande dificuldade a falta de pontos de coleta suficientes (LARUCCIA *et al.*, 2011).

O estudo aqui apresentado abordou a situação do cenário atual em relação ao gerenciamento de seus resíduos e à logística reversa, apresentando os possíveis destinos dos materiais obtidos pela reciclagem de LF usadas.

O presente estudo considera as LF do tipo compacta e tubular, pois se caracterizam pelo maior consumo em relação aos demais tipos de lâmpadas de descarga de gás e por estarem presentes em quantidades relevantes nas residências do país.

Este trabalho teve como objetivo demonstrar a importância da destinação adequada de LF usadas, apresentando os processos e tecnologias de reciclagem, os materiais obtidos e a sua destinação, através de estudo comparativo entre Brasil e Alemanha.

Logística reversa

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), considera-se 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. (BRASIL, 2010, p. 2).

Um dos instrumentos para a realização da PNRS, a qual define a obrigatoriedade da logística reversa para LF, é a educação ambiental. Sendo assim, na PNRS, baseando-se na responsabilidade compartilhada, os consumidores possuem a obrigação de retornar os produtos usados, listados no *caput* da lei, aos canais de comercialização e distribuição, os quais por sua vez devem direcioná-los aos fabricantes (BRASIL, 2010).

Uma pesquisa realizada em Pelotas, Rio Grande do Sul, demonstrou que mais de 58% dos estabelecimentos comerciais recebem as lâmpadas, porém com período de armazenamento por tempo indeterminado, e aponta o não recebimento das mesmas pelos fornecedores. Cerca de 95% dos habitantes entrevistados têm conhecimento sobre a destinação das lâmpadas usadas, que vão para o aterro sanitário em conjunto com o lixo doméstico, e sabem que existem falhas nas informações sobre os elementos tóxicos contidos nas lâmpadas (SAMPAIO & SÁ, 2009).

Outro estudo realizado em Minas Gerais também demonstrou que os consumidores apresentaram falhas no conhecimento quanto aos perigos e impactos socioambientais que uma lâmpada contendo mercúrio pode causar. O consumo de LF vem aumentando desde 2001, após o episódio do “apagão” (problema de fornecimento de energia). Contudo, as políticas públicas voltadas à informação da sociedade sobre os efeitos tóxicos do mercúrio ainda não são claramente evidenciadas. É fundamental a inserção da educação ambiental na problemática de descarte de LF, com esclarecimentos para a sociedade sobre os efeitos do mercúrio, medidas de segurança e de pós-consumo, como a destinação final adequada. Desta forma, o conhecimento sobre riscos, manuseio e reciclagem através da educação ambiental faz com que os consumidores sejam motivados a contribuir para a destinação ecologicamente correta das LF através da logística reversa (CARNEIRO, 2010).

Os principais custos envolvidos estão relacionados ao gerenciamento das operações logísticas, à imagem corporativa e aos custos operacionais. Os custos de transporte podem ser reduzidos através de consolidação da carga, por exemplo. Através da remuneração gerada por alguns itens pós-consumo ocorre a estruturação natural de canais de distribuição reversos. No entanto, outros canais somente são desbloqueados por meio de fatores modificadores governamentais, os quais objetivam principalmente adequar a destinação final dos resíduos gerados. O efeito de regulamentações

também catalisa a formação de novos negócios e parcerias do ponto logístico e tecnológico (LEITE, 2009).

Segundo Xie *et al.* (2007), dentre as dificuldades para a implantação da logística reversa comparando com a cadeia normal de distribuição estão o recebimento de materiais variados, os lotes pequenos, a operação de coleta e as irregularidades do retorno. Considera-se um grande desafio o retorno dos produtos ao local em que devem ser reciclados ou ter uma disposição final adequada. Segundo Rogers e Tibben-Lembke (1998), um sistema de informação adequado deve ser considerado para o gerenciamento das operações e as atividades de seleção/triagem dos materiais devem ser avaliadas. Além disso, um bom sistema de logística reversa envolve a simplificação dos procedimentos de retorno.

Segundo Leite (2009), uma visão holística da logística reversa permite a redução de inibidores da sua implantação. Então, se torna importante o conhecimento das oportunidades de retorno dos materiais, das tecnologias utilizadas para coleta e reciclagem além do controle das operações através de indicadores.

Tecnologias de reciclagem de lâmpadas fluorescentes

Os materiais oriundos da reciclagem de LF podem ser classificados em quatro tipos: pó de fósforo contendo mercúrio, vidro, isolamento baquelítico e terminais de alumínio com seus constituintes ferro-metálicos (DURÃO JÚNIOR & WINDMÖLLER, 2008).

O índice de reciclagem do Brasil em 2007 foi de 6% em relação aos 100 milhões de unidades de lâmpadas fluorescentes geradas. Para a mesma quantidade gerada, a Alemanha apresentou índice de 50% (MRT SYSTEM, 2007 *apud* SANCHES, 2008).

As alternativas para destinação de LF e seu tratamento no Brasil são: tratamento por sopro, moagem simples, moagem com tratamento químico ou térmico e solidificação/encapsulamento. As tecnologias disponíveis para reciclagem e destinação de LF no Brasil estão apresentadas no Quadro 1.

Na Alemanha, as tecnologias estabelecidas para reciclagem de lâmpadas de descarga incluem o método de corte dos terminais (*end cut*), *shredder*, fragmentação por via úmida (*broken glass washing*), extração específica de produtos (*product-specific stripping*) e o método de separação centrífuga (*centrifugal separation method*). Alguns desses métodos podem ser conduzidos em sistemas móveis ou fixos (ZVEI, 2008). Essas tecnologias de reciclagem encontram-se descritas no Quadro 2.

METODOLOGIA

A metodologia adotada foi baseada em levantamento bibliográfico e na realização de visitas a recicladoras e outras empresas do Brasil e da Alemanha, através da utilização de questionário padrão.

Quadro 1 - Tecnologias de reciclagem e destinação de lâmpadas fluorescentes do Brasil.

Tecnologia	Descrição
Moagem simples	O sistema de moagem simples realiza a ruptura das lâmpadas e através de um sistema de sucção promove a retenção de uma parcela do mercúrio contido nas lâmpadas. Sendo assim, esse sistema impede que o mercúrio seja liberado para a atmosfera. Na maioria desses processos, os materiais não são separados e geralmente são destinados ao aterro industrial.
Trituração com tratamento químico	A moagem com tratamento químico é constituída de duas fases principais: esmagamento e retenção do mercúrio. Nesse processo é realizada a lavagem do vidro e na sequência é feita a separação do pó de fósforo. O líquido é tratado quimicamente, sendo realizada a separação do mercúrio.
Trituração com tratamento térmico	O processo de moagem com tratamento térmico possui duas etapas principais: esmagamento e destilação de mercúrio. Essa tecnologia possibilita a recuperação do mercúrio através do aquecimento da fração contendo pó fosfórico, vaporização do mercúrio e posterior condensação. Considera-se a melhor alternativa de tratamento, pois permite que o mercúrio seja recuperado.
Sopro	Utiliza-se o tratamento por sopro somente para lâmpadas fluorescentes tubulares. Neste caso, as extremidades são rompidas com aquecimento e resfriamento. Então, através do tubo de vidro, uma corrente de ar é soprada, promovendo o arraste do pó de fósforo com mercúrio. Entretanto, como no sistema de moagem simples, o teor total de mercúrio não é removido.
Solidificação/ Encapsulamento	No sistema de solidificação/encapsulamento, realiza-se um esmagamento e posterior encapsulamento dos materiais restantes e destinação a aterros.

Fonte: Adaptado de Mornbach *et al.* (2008).

Levantamento de dados sobre recicladoras de lâmpadas fluorescentes

Para realizar o levantamento das tecnologias de reciclagem de LF no Brasil, foi considerado o levantamento realizado por Polanco (2007), as empresas listadas no website do CEMPRESA (2010), o mapeamento de empresas destinadoras de resíduos de equipamentos elétrico-eletrônicos (REEE) realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABETRE, 2013) e a Nota Informativa do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2011) sobre controle, produção, importação e comercialização de mercúrio no Brasil. Cruzando essas informações e excluindo as companhias que são unidades de aterros para resíduos perigosos, foi obtida uma lista atualizada das destinadoras de LF do Brasil. A partir dessas informações foi elaborado um

Quadro 2 - Tecnologias de reciclagem de lâmpadas fluorescentes da Alemanha.

Tecnologia	Descrição
Corte dos terminais (<i>end cut</i>)	O processo de corte dos terminais é empregado principalmente em LF tubulares. Após o corte das extremidades ocorre a remoção de fósforo por sopro no interior do tubo de vidro. Na sequência o vidro é triturado e pode ser usado para a fabricação de novas lâmpadas.
<i>Shredder</i>	Através do método de <i>shredder</i> podem-se processar todos os tipos de lâmpadas, inclusive lâmpadas quebradas. São utilizadas peneiras para auxiliar na separação dos materiais. Neste método o vidro pode ser obtido em três frações com diferentes granulometrias. A fração grossa consiste no vidro que é removido da base das lâmpadas. A fração média tem partículas de 5 mm, oriundas do vidro aderido ao plástico. A fração fina contém pó de fósforo e pó de vidro. O mercúrio pode ser removido dessa última fração por tratamento térmico, através do uso da destilação.
Fragmentação por via úmida (<i>broken glass washing</i>)	O método de fragmentação do vidro por via úmida pode ser aplicado para grandes volumes e para vários tipos de LF. A remoção do mercúrio pode ser realizada por destilação e o vidro, após secagem, é encaminhado para unidade de detecção automática de metais.
Extração específica de produtos (<i>product-specific stripping</i>)	Para fazer uso da tecnologia de extração específica de produtos, somente lâmpadas com tamanhos semelhantes podem ser processadas. Uma vantagem é a separação do mercúrio dos outros materiais no primeiro estágio. Entretanto, uma desvantagem é a seleção manual das lâmpadas.
Separação centrífuga (<i>centrifugal separation method</i>)	O método de separação centrífuga só não é aplicável a lâmpadas tubulares. Geralmente, consiste em etapas de trituração, peneiramento e aquecimento dos materiais.

Fonte: Adaptado de Zvei (2008).
FL: lâmpadas fluorescentes.

questionário padrão para obter dados sobre a capacidade dessas companhias, operações logísticas, tipos de coletores, tecnologias, custos de reciclagem e destinação dos materiais.

No intuito de avaliar os processos adotados, foram realizadas visitas em empresas destinadoras de LF usadas. Foi visitada em março de 2011 uma empresa de descontaminação de lâmpadas localizada em Curitiba, Paraná. Na sequência, foi realizada uma visita em importador/distribuidor de LF para observar o funcionamento do equipamento de descontaminação de lâmpadas mercuriais. Foram também visitadas as empresas recicladoras que localizam-se em Cotia e Paulínia, ambas em São Paulo. As visitas técnicas foram realizadas em julho de 2011 e maio de 2012, respectivamente. Na Alemanha, foram realizadas visitas nas

recicladoras de LF localizadas em Brand-Erbisdorf, em janeiro de 2012, em Nuremberg, em março de 2012, em Baar e em Essen em abril de 2012.

Levantamento de dados sobre transportadoras de lâmpadas usadas

Em julho de 2011 foi realizada visita na empresa que executa operações logísticas para LF usadas em São Paulo, com o objetivo de aprimorar o entendimento sobre a legislação relevante para essa atividade, a documentação necessária para transportar resíduos perigosos e verificar o coletor utilizado.

A associação responsável pela logística reversa de LF na Alemanha, *Lightcycle*, na cidade de Munique, Baviera, foi visitada em abril de 2012. Nesta ocasião foi possível realizar verificações sobre a gestão do sistema e a operacionalização das respectivas atividades.

RESULTADOS

Geração de resíduos

Através das visitas técnicas realizadas, das informações recebidas das recicladoras por correio eletrônico e dos dados obtidos por Polanco (2007), tornou-se possível estimar o processamento de LF no Brasil em aproximadamente 12,35 milhões de unidades, em 2011. Considerando esse processamento total e o índice de reciclagem de 6%, obteve-se uma geração de resíduos de aproximadamente 206 milhões de unidades de LF usadas, em 2011.

Comparando essa geração estimada de resíduos de LF usadas, de 206 milhões de unidades, em 2011, com 100 milhões em 2007 (MRT System, 2007 *apud* SANCHES, 2008), verifica-se um aumento de 106% em 4 anos. O aumento médio da geração de resíduos foi de 26,5% ao ano. Para o cálculo da geração de resíduos em 2012, considerou-se esta média, pois não se obteve o valor do aumento anual dos resíduos. Desta forma, obteve-se a geração estimada de resíduos de LF, prevista para 2012, em aproximadamente 260 milhões de unidades.

Esse valor está próximo ao parque de LF, da pesquisa da Eletrobrás (2010), sendo o montante em uso superior a 263 milhões de unidades, com tempo de vida útil não determinado.

Desta forma, torna-se essencial para a implantação da logística reversa, o controle adequado pelo setor com maior precisão da quantidade dessas lâmpadas que circulam no país e adotar uma metodologia oficial para o cálculo de resíduos de lâmpadas, para que esse sistema seja eficiente, visando reduzir os impactos ambientais. Na Alemanha, esta atividade é realizada pela entidade EAR em conjunto com a Agência Ambiental, sendo a EAR responsável

pelo registro das quantidades produzidas, importadas, coletadas e recicladas (EAR, 2013). Para organizar o sistema alemão de coleta de lâmpadas usadas foram criadas associações como a *Lightcycle*. Essa associação sem fins lucrativos é responsável pela logística reversa de LF pós-consumo, gerenciando as atividades de coleta e de transporte. Existem dois consórcios responsáveis pela gestão financeira do sistema e pelas atividades de reciclagem, o WEEE Service e o LARS. Atualmente, no Brasil, somente existem iniciativas pontuais de logística reversa de LF, sem a adoção de associações, nem de padrões.

Através do estudo, a capacidade instalada de processamento de LF foi estimada em 22,74 milhões de unidades/ano, equivalente a 11% da geração de LF usadas, em 2011 (206 milhões de unidades de LF). Sendo assim, considera-se importante o uso de fundos nacionais disponíveis como o do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para ampliação das recicladoras atuais e criação de incentivos fiscais, como a redução de impostos relacionados a essa atividade.

No caso da Alemanha, os dados de comercialização de lâmpadas de descarga de gás mais atuais e consolidados pela agência ambiental alemã (BMU, 2008) estão disponíveis, então, considerou-se a geração de resíduos para 2012 de aproximadamente 160 milhões de unidades de LF. Com base nessa geração e o número verificado em 2008 (100 milhões de resíduos de LF.ano⁻¹), o índice de aumento da quantidade de resíduos gerada foi de aproximadamente 15% ao ano (MRT SYSTEM, 2007 *apud* SANCHES, 2008).

Através da pesquisa foi obtido o valor de 43 milhões de LF processadas por ano na Alemanha, sendo a capacidade instalada estimada em 121 milhões de LF por ano. Esse valor, em relação à geração de resíduos prevista para 2012, gera um índice de atendimento a demanda de 76%.

Na Tabela 1 observa-se um comparativo de informações gerais obtidas e estimadas para o Brasil e Alemanha para o ano de 2012.

Vale a pena ressaltar que o modelo alemão possui uma legislação que tem papel fundamental no controle do uso de mercúrio em equipamentos elétrico-eletrônicos (EEE). A diretiva europeia 2002/95 fixa limites de mercúrio, de acordo com o tipo de lâmpada, evitando que quantidades desnecessárias de mercúrio sejam empregadas na fabricação de LF.

Os princípios da PNRS e da *ElektroG* (lei para gestão de resíduos de EEE) são similares, como o do poluidor pagador (BRASIL, 2010; ALEMANHA, 2005). No entanto, a legislação alemã não estabelece a participação obrigatória dos comerciantes e distribuidores. Além disso, outra diferença é que ainda não foi instituída no Brasil uma regulamentação federal específica para gestão de lâmpadas fluorescentes, como a *ElektroG* da Alemanha.

A *ElektroG* fixa o índice de reciclagem em 80% do peso das lâmpadas, entretanto, metas para a coleta ainda não estão definidas. Nessa lei também é estabelecida a remoção do mercúrio, mas não se define sobre a sua recuperação e nem as possíveis destinações.

Em relação às operações logísticas, a organização do país em regiões logísticas, como na Alemanha, conforme a geração de lâmpadas e densidade populacional, além de operadores logísticos estrategicamente localizados, favorece a redução dos custos, através de consolidação das cargas e a otimização das rotas até o reciclador.

A condução adequada das atividades de reciclagem, conforme os requisitos da lei, é avaliada através de auditorias externas contratadas pelo reciclador, as quais geram a certificação na lei *ElektroG*, que significa a permissão para a realização das operações.

Para incentivar a participação dos consumidores é fundamental a disponibilização de informações sobre os riscos que esse tipo de lâmpada pode causar à saúde e ao meio ambiente, bem como ampla divulgação dos pontos de coleta e sobre os símbolos utilizados para a rotulagem das lâmpadas. A *Lightcycle* disponibiliza informação sobre pontos de coleta e o que fazer em caso de quebras, em

Tabela 1 - Comparativo geral entre Brasil e Alemanha.

Item	Alemanha	Brasil
Geração de Resíduos de LF/ ano	160000000 ⁽¹⁾	260000000 ⁽²⁾
Índice de reciclagem/geração	30% ⁽¹⁾	6% ⁽³⁾
Capacidade das recicladoras/geração	76% ^(4,2)	11% ⁽²⁾
Pontos de coleta atuais	8.200 ^(4,5)	264 ⁽⁶⁾
Uso da tecnologia de recuperação de mercúrio	Sim ⁽²⁾	Sim ⁽²⁾
Uso da tecnologia de recuperação de terras raras	Sim ^(2,7)	Não encontrado ⁽²⁾

Fonte: ⁽¹⁾BMU (2008); ⁽²⁾BACILA (2012); ⁽³⁾MRT System (2007) *apud* Sanches (2008); ⁽⁴⁾*Lightcycle* (2012); ⁽⁵⁾EU-RECYCLING (2011); ⁽⁶⁾Brasil (2009); ⁽⁷⁾Bornmann (2012). LF: lâmpadas fluorescentes.

website próprio. Atualmente são 8.200 pontos de coleta. Os coletores utilizados para a coleta e transporte de lâmpadas fluorescentes da *Lightcycle* são padronizados, visando reduzir quebra e otimizar essa atividade. Na Alemanha foi realizada simplificação da documentação utilizada, após discussões com o governo, com o objetivo de reduzir a burocracia e os custos logísticos.

No Brasil há poucos pontos de coleta para LF pós-consumo, sendo que há 264 pontos disponíveis nos municípios. Vale a pena ressaltar que o Brasil é constituído por mais de 5.500 municípios e para a implantação da logística reversa no país são previstos pontos de coleta, distribuídos estrategicamente, devido às grandes dimensões continentais e à densidade demográfica de cada região. A disponibilização desses pontos de coleta com coletores adequados é fundamental para que aconteça o recolhimento das LF de forma adequada.

A documentação, a sinalização e o código da Organização das Nações Unidas (ONU) adotado para o transporte no Brasil ainda não é uniforme. O número da ONU para o transporte de LF mais adotado no Brasil é o 3077 (“substância que apresenta risco para o meio ambiente, sólidas”), entretanto, também adota-se o 3082 (“substância que apresenta risco para o meio ambiente, líquidas”), pois não há código específico para resíduos de LF, somente para mercúrio metálico, considerado como um produto perigoso (ANTT, 2004). Essa divergência no uso dos códigos pode ocorrer, pois o mercúrio pode se apresentar nos estados líquido, gasoso e sólido, e no caso de ocorrer um acidente durante o transporte, pode haver a contaminação da água, do solo e do ar. Além disso, os coletores utilizados para o acondicionamento e para o transporte variam muito, o que pode impactar nos custos e elevar o índice de quebras durante as operações logísticas, oferecendo riscos ao meio ambiente. Logo, torna-se importante o esclarecimento das legislações envolvidas e a padronização dos requisitos, bem como códigos obrigatórios e coletores padrões para a realização de tal atividade.

Quadro 3 - Comparativo das tecnologias de reciclagem de lâmpadas fluorescentes.

Recicladoras do Brasil	Recicladoras da Alemanha
Sopro + tratamento térmico	Corte de terminais
Moagem + tratamento térmico	-
-	<i>Shredder</i>
Moagem via úmida + tratamento químico	Moagem via úmida + recuperação de mercúrio
-	Extração específica de produtos

Tecnologias de reciclagem de lâmpadas fluorescentes

Avaliando as tecnologias das empresas visitadas no Brasil e na Alemanha, obteve-se o Quadro 3, o qual compara as técnicas de reciclagem. Pode-se dizer que a tecnologia de corte de terminais empregada para LF tubulares é similar à tecnologia de corte dos terminais/sopro utilizada no Brasil. Entretanto, as empresas visitadas na Alemanha que fazem uso da tecnologia de corte de terminais, não realizam a recuperação do mercúrio. A tecnologia de extração de componentes específicos para lâmpadas fluorescentes compactas (LFC), somente foi verificada na Alemanha. A tecnologia de moagem via úmida do Brasil e da Alemanha podem ser consideradas semelhantes, principalmente devido à quebra do vidro por via úmida em ambos os casos, sendo empregada para todos os tipos de LF. O método de *shredder*, o qual emprega trituração e posterior separação por peneiras, somente foi evidenciado na Alemanha. O método de trituração ou moagem simples, em alguns lugares do Brasil chamado de papa lâmpadas, sistema móvel, o qual pode operar com todos os tipos de lâmpadas, foi observado somente no Brasil.

Cada uma das tecnologias avaliadas possui obtenção de frações com diferentes graus de pureza, ocasionando a variação da destinação dos materiais obtidos.

Destinação dos materiais obtidos da reciclagem de lâmpadas fluorescentes

Comparando a destinação dos materiais obtidos do processo de reciclagem de LF, no caso do vidro de alta qualidade, verifica-se que um dos diferenciais é a destinação do vidro na Alemanha para a fabricação de novos tubos para LF, e no caso do Brasil para a fábrica de cerâmica, pois não há fábrica de tubos de vidro de lâmpadas no Brasil (ABIVIDRO, 2012). Na Alemanha, o vidro que é destinado ao próprio fabricante de lâmpadas tem as análises do teor de mercúrio realizadas no recebimento desse material, devido ao limite previsto na lei *ElektroG*, de 5 mgHg.kg⁻¹ de vidro. Dessa forma, é possível o retorno da maior parte do vidro recuperado da reciclagem de LF para a manufatura de novos tubos de vidros para as LF.

Outra diferença entre Brasil e Alemanha em relação à destinação dos materiais obtidos da reciclagem de LF constitui-se na destinação do pó de fósforo para a recuperação dos elementos terras raras na Alemanha e no caso do Brasil para a fábrica de cerâmica, indústria de tintas e pigmentos. Em ambos os países, os metais obtidos são encaminhados para empresas de fundição e os componentes eletrônicos para empresas especializadas na extração dos materiais valiosos.

Em relação ao mercúrio, as destinações são diversas. No caso da Alemanha, parte do mercúrio retorna para a indústria de lâmpadas, no caso do Brasil essa destinação não foi evidenciada. O Brasil apresentou destinação de parte do mercúrio da reciclagem de LF para a mineração de ouro. Uma parcela desse mercúrio também é encaminhada para a indústria química, uso em reagentes químicos, equipamentos de medição e para sua aferição, em ambos os países. Na Alemanha, parte do mercúrio é destinado para a indústria de cloro-álcali. No Brasil, uma parcela do mercúrio recuperado da reciclagem de LF é também destinada para institutos de pesquisa, niquelação de ferro, e outra parte é disponibilizada para a exportação. Alguns materiais obtidos da reciclagem de lâmpadas são dispostos em aterro, o que carrega parte do mercúrio presente nas LF usadas.

Em relação à quantidade de LF usadas que têm o seu destino inadequado, foi realizado um cálculo visando obter o desperdício de materiais de resíduos de LF no Brasil e na Alemanha e quantificar os potenciais impactos ambientais. Para o Brasil, conforme a Tabela 2, considerou-se a maior geração como sendo de LFC, pois é o tipo de lâmpada de descarga de gás mais consumido no mercado brasileiro. Para o cálculo, foi adotada a geração de resíduos estimada para 2012, ou seja, 260 milhões de unidades de LF.

Baseando-se na composição das LFC e adotando o índice de reciclagem de 6% (MRT SYSTEM, 2007 *apud* SANCHES, 2008), estima-se que sejam desperdiçados, pela destinação inadequada (94% das LF), cerca de 43.014 t de vidro, 2.444 t de metais, 1.955 t de componentes eletrônicos, 1.466 t de pó de fósforo e de 2,44 t de mercúrio. A liberação de mais de 2.000 kg por ano de mercúrio ao meio ambiente causa sérios impactos ambientais negativos e irreversíveis.

Na Alemanha, considerou-se a geração de resíduos para 2012, de acordo com os dados de comercialização de lâmpadas do Ministério do Meio Ambiente, equivalente a aproximadamente 160 milhões de unidades de LF usadas. Conforme a Tabela 3, a partir das vendas (BMU, 2008), adotando o índice de reciclagem para LF de 30% e baseando-se na composição de Rabah (2008) para as LF tubulares, pois são as mais consumidas no mercado alemão (ZVEI, 2008), estima-se que sejam desperdiçados, pela destinação inadequada (70% das LF), cerca de 21.213 t de vidro, 470 t de metais, 448 t de pó de fósforo e de 1,12 t de mercúrio. Assim como no Brasil, a liberação de mais de 1.000 kg por ano de mercúrio ao meio ambiente causa sérios e irreparáveis impactos ambientais negativos.

Tabela 2 - Desperdício estimado de materiais de lâmpadas fluorescentes no Brasil.

Composição das lâmpadas fluorescentes compactas	Geração de resíduos (t.ano ⁻¹)	Destinação estimada para recicladoras (6%) (t.ano ⁻¹)	Desperdício de materiais estimado (t.ano ⁻¹)
Vidro - 88%	45.760	2.746	43.014
Metais - 5%	2.600	156	2.444
Plástico (reator com componentes eletrônicos) - 4%	2.080	125	1.955
Pó de fósforo - 3%	1.560	94	1.466
Mercúrio - 0,005%	260	0,16	2,44
Total	52.003	3.120	48.882

Tabela 3 - Desperdício estimado de materiais de lâmpadas fluorescentes na Alemanha.

Composição das lâmpadas fluorescentes tubulares	Geração de resíduos (t.ano ⁻¹)	Destinação estimada para recicladoras (30%) (t.ano ⁻¹)	Desperdício de materiais estimado (t.ano ⁻¹)
Vidro - 94,7%	30.304	9.091	21.213
Metais - 2,1%	672	202	470
Pó de fósforo - 2%	640	192	448
Mercúrio - 0,005%	160	0,48	1,12
Total	31.618	9.485	22.132

Potencial de recuperação de elementos terras raras

A grande oportunidade observada para apoiar a reciclagem de LF é a recuperação dos elementos terras raras do pó fosfórico. Ambos os países importam grandes quantidades desses elementos. No caso da Alemanha, 1.840 t.ano⁻¹ (EUROSTAT, 2010 *apud* SCHÜLER *et al.*, 2011).

Segundo Schüler *et al.* (2011), a reciclagem de elementos terras raras na Europa é realizada por poucas empresas, mas a tendência é de aumento nos índices de reciclagem, devido à demanda desses elementos, escassez e aumento dos preços.

De acordo com os valores calculados, considerando em média 10% da composição deste pó, correspondente a esses elementos, obteve-se o potencial estimado para a recuperação de elementos terras raras do pó fosfórico de LF de 156 t.ano⁻¹ para o Brasil e 64 t.ano⁻¹ para a Alemanha. Essas quantidades poderiam ajudar a suprir a demanda desses países quanto ao consumo de terras raras.

A empresa Rhodia realiza a recuperação de terras raras na Europa, detendo 20% do mercado (RHODIA, 2011). A Rhodia possui uma patente de recuperação desses elementos de uma mistura de halofosfatos com terras raras em fase sólida, utilizando ácidos e bases no processo de separação dos sais de terras raras (RHODIA OPERATIONS, 2010).

Pelo fato do térbio e do európio serem considerados elementos terras raras onerosos e escassos, as LF podem ser ditas como fontes para esses elementos. A empresa Osram possui uma patente relacionada à recuperação de térbio, ítrio e európio de LF usadas, a qual tem como etapas do processo: tratamento mecânico, separação do halofosfato, extração e digestão ácida e precipitação. Através deste método torna-se possível a obtenção de óxidos de terras raras puros e considera-se o método desenvolvido como economicamente viável e ambientalmente adequado. Além disso, a reciclagem do pó fosfórico das lâmpadas fluorescentes apresenta ganhos ambientais relacionados principalmente a evitar a extração de nova matéria-prima (OSRAM GMBH, 2011).

Outras patentes relacionadas à recuperação de elementos terras raras de material fluorescente foram depositadas pela *General Electric*. A mais recente e aprimorada contempla as etapas da queima do fósforo em meio alcalino, gerando a decomposição do fósforo em uma mistura de óxidos, extração do resíduo da mistura e tratamento desse resíduo visando obter uma solução, e por fim, a separação dos elementos terras raras (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2012).

Sendo assim, as patentes relacionadas à recuperação já estão publicadas, permitindo acesso à tecnologia desenvolvida e a obtenção de ganhos ambientais e socioeconômicos.

CONCLUSÕES

Através deste estudo foi possível verificar que, devido às políticas de banimento das lâmpadas incandescentes, a aquisição e utilização de LF tende a aumentar. A estruturação da logística reversa torna-se cada vez mais necessária para reverter o quadro atual de destinação das LF para diferentes modalidades de aterro, evitando os impactos ambientais negativos e irreversíveis ocasionados pela liberação de mercúrio.

Para isto, torna-se importante a criação de um sistema estruturado de informações sobre a produção e importação de LF, bem como para o controle da geração de resíduos, a qual foi estimada em 206 milhões de LF para 2011 e 260 milhões prevista para 2012. Além disso, é fundamental a instituição de legislação federal específica definindo os limites para o uso de mercúrio em lâmpadas e critérios da gestão dos resíduos, incluindo requisitos uniformes para a realização das operações logísticas, como uso de coletores padronizados.

Cada uma das tecnologias avaliadas obtém frações com diferentes graus de pureza, desta forma ocasionando a variação da destinação dos materiais obtidos. A qualidade do material reciclado depende também das características do mercado, sendo influenciada por este, como a destinação do vidro para as indústrias de cerâmica no Brasil.

Em relação ao mercúrio, deve-se avaliar o estabelecimento de uma política de incentivo ao reuso, e não somente a remoção desse metal pesado das LF. Desta forma, a importação desse metal pesado e os impactos ambientais são reduzidos e evita-se a extração de recursos naturais não renováveis.

O pó fluorescente é um dos materiais obtidos da reciclagem de LF que apresenta grande potencial de valorização, devido à presença dos elementos terras raras. As tecnologias para recuperação já existem, mas são pouco utilizadas. Entretanto, há forte tendência para modificações no mercado, devido à escassez prevista para esses elementos.

A destinação dos materiais obtidos do processo de reciclagem de LF deve ser conduzida ao ciclo de fabricação de novas lâmpadas. Caso essa alternativa não seja possível, devido às características de mercado da região, uma segunda opção deve ser a utilização em outros ciclos produtivos. Como última alternativa deve ser realizada a disposição em aterro autorizado para o recebimento de resíduos perigosos.

REFERÊNCIAS

- ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. (2013) Perfil do Setor de Tratamento de Resíduos. Disponível em: <http://www.abetre.org.br/biblioteca/publicacoes/publicacoes-abetre/copy2_of_ABETREPerfildoSetordeTratamentodeResduos042013.pdf>. Acesso em: 20 dez 2013.
- ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. (2012) Fábrica de vidro de lâmpadas no Brasil [mensagem de trabalho]. Mensagem recebida por: <recicla@abividro.org.br> em: 9 abr 2012.
- ALEMANHA. (2005) Act Governing the Sale, Return and Environmentally Sound Disposal of Electrical and Electronic Equipment (Electrical and Electronic Equipment Act, or ElektroG). Disponível em: <<http://www.gesetze-im-internet.de>>. Acesso em: 18 dez 2011.
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2004) Resolução nº 420, de 12 de fevereiro de 2004. Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>. Acesso em: 04 ago 2011.
- BACILA, D.M. (2012) *Uso da Logística Reversa para Apoiar a Reciclagem de Lâmpadas Fluorescentes Usadas: Estudo Comparativo entre Brasil e Alemanha*. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BASTOS, F.C. (2011) *Análise da Política de Banimento de Lâmpadas Incandescentes do Mercado Brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. (2008) Elektro und Elektronikgeräte in Deutschland: Daten 2008 zur Erfassung, Wiederverwendung und Behandlung. Disponível em: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/daten_elektrogeraete_2007_2008_bf.pdf>. Acesso em: 16 fev 2012.
- BONMANN, C. (2012) Lamp recycling in changing markets. In: *11th International Electronic Recycling Congress*, Salzburg.
- BRASIL. (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 03 ago 2010.
- BRASIL. (2009) Ministério Das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, DF, maio de 2009. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRterterTERTer=91>>. Acesso em: 15 dez 2011.
- CAIN, A.; DISCH, S.; TWAROSKI, C.; REINDL, J.; CASE, C.R. (2007) Substance flow analysis of mercury intentionally used in products in the United States. *Journal of Industry Ecology*, v. 11, n. 3, p. 61-75.
- CARNEIRO, D.M.R. (2010) *Da loucura dos gatos dançantes ao circuito do século XXI: o mercúrio contido nas lâmpadas e a importância da educação no processo de gestão ambiental*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável). Universidade de Brasília, Brasília.
- CEMPRE - Compromisso Empresarial para a Reciclagem. (2010) Coleta Seletiva. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/ciclosoft_2010.php>. Acesso em: 28 out 2011.
- DURÃO JÚNIOR, W.A. & WINDMÖLLER, C.C. (2008) A questão do mercúrio em lâmpadas fluorescentes. *Revista Química Nova Escola*, n. 28, p. 15-19.
- EAR - Elektro-Altgeräte-Register. (2013) Kennzahlen. Disponível em: <http://www.stiftung-ear.de/service_und_aktuelles/kennzahlen/abholungen_gesamt_>. Acesso em: 16 jun 2013.
- ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (2010) Avaliação dos Resultados do PROCEL. Disponível em: <<http://www.elektrobras.com/pci/main.asp?View=%7B5A08CAFO-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B3D6B5B08-7D10-4FFA-9C6E-79917877F573%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 24 out 2011.
- EU-RECYCLING. (2011) Das Fachmagazin für den europäischen Recycling market. *Glas Klar*. Biburg, v. 29, n. 12-11, p. 12-16.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY. (2012) Rare earth recovery from fluorescent material and associated method. Concessão US8137645 B2.
- HU, Y. & CHENG, H. (2012) Mercury risk from fluorescent lamps in China: current status and future perspective. *Environment International*, v. 44, p. 141-150.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (2011) Nota Informativa nº 36. Assunto: Controle de produção, importação, comercialização e uso de mercúrio no Brasil. [mensagem de trabalho]. Mensagem recebida por: <otavio.maioli@mma.gov.br> em: 08 mar 2012.
- LARUCCIA, M.M.; NASCIMENTO, J.V.; DEGHI, G.J.; GARCIA, M.G. (2011) A study of consumer behavior on recycling of fluorescent lamps in São Paulo. *International Journal of Business Administration*, v. 1, n. 3, p. 101.
- LEITE, P.R. (2009) *Logística Reversa - Meio Ambiente e Competitividade*. 2 ed. São Paulo: Prentice Hall, 240 p.
- LIGHTCYCLE. (2012) Rücknahmesystem. Disponível em: <<http://www.lightcycle.de/>>. Acesso em: 16 fev 2012.
- MOMBACH, V.L.; RIELLA, H.G.; KUHNEN, N.C. (2008) O estado da arte na reciclagem de lâmpadas fluorescentes no Brasil: Parte 1. *ACTA Ambiental Catarinense*, v. 5, n. 1/2, p. 43-53.

OSRAM GMBH. (2011) Method for recovery of rare earths from fluorescent lamps. Patent nº US7,976,798 B2.

PAWLOWSKI, L. (2011) Effect of mercury and lead on the total environment. *Environmental Protection Engineering*, v. 37, n. 1, p. 105-117.

POLANCO, S.L.C. (2007) *A situação da destinação pós-consumo das lâmpadas de mercúrio no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) -Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, São Paulo.

RABAH, M.A. (2008) Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps. *Waste Management*, v. 28, p. 318-325.

RHODIA OPERATIONS. (2010) Method for recovering rare earth elements, from a solid mixture containing a halophosphate and a compound of one or more rare earth elements. WO 2010/118967.

ROGERS, D.S. & TIBBEN-LEMBKE, R.S. (1998) Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reverse Logistics Executive

Council. Disponível em: <<http://www.rlec.org/reverse.pdf>>. Acesso em: 06 jun 2011.

SAMPAIO, M.R.F. & SÁ, J.S. (2009) Diagnóstico da situação de lâmpadas fluorescentes pós-consumo em Pelotas, RS. In: *Livro de Resumos da 2ª Mostra de Trabalhos de Tecnologia Ambiental*, p. 36-39.

SANCHES, E.S.S. (2008) Logística reversa de pós-consumo do setor de lâmpadas Fluorescentes. In: *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Salvador: CONEM.

SCHÜLER, D.; BUCHERT, M.; LIU, R.; DITTRICH, G.S.; MERZ, C. (2011) Study on rare earths and their recycling. Report for the Greens/EFA Group in European Parliament. Darmstadt, Germany: ÖKO-INSTITUT. 140 p. Relatório Técnico.

XIE, R.; CHEN, B.; QIU, Z.; ZHANG, Y. (2007) Reverse Logistics Chain. Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, China, v. 6.

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (2008) Collection and recycling of discharge lamps. Disponível em: <<http://www.zvei.org>>. Acesso em: 09 fev 2012.