

PATRICIA DE SOUZA MEDEIROS BARBOSA

**Verificação da ocorrência de mercúrio nos resíduos de
lâmpadas trituradas após processamento em equipamentos
móveis**

Monografia elaborada como
requisito para conclusão do
Curso de Especialização em
Gerenciamento Ambiental da
Escola Superior de Agricultura
Luiz de Queiroz – ESALQ/USP

Dr. Cristiano Kenji Iwai

Piracicaba

2015

*Aos meus pais Diniz e Elza,
à minha irmã Paula
e ao Luís Alberto*

Por todo amor, apoio e incentivo

Dedico

AGRADECIMENTOS

À CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e à coordenação do CEGEA da ESALQ/USP pela oportunidade e bolsa concedida.

Ao meu orientador e amigo Cristiano pelo apoio técnico e ensinamentos, não somente na elaboração da monografia, como durante toda minha jornada profissional. Agradeço ainda pela paciência com alguns atrasos.

À amiga Ana Carolina, exemplo de mãe e profissional, que tive a oportunidade de conhecer no curso e iniciar uma grande amizade. Agradeço ainda pela generosidade, companhia e caronas.

Ao Bruno, Edegar e Eliana pela excelente companhia durante as viagens à Piracicaba e pelas caronas.

Aos amigos da CETESB pelo incentivo, ensinamentos e amizade. Em especial, à Julia Alice pela indicação para uma grande oportunidade profissional, da qual serei eternamente grata.

À amiga Irene pelas conversas enriquecedoras e pelo cuidado de sempre.

Aos meus pais Diniz e Elza e à minha irmã Paula por todo amor, cuidado e incentivo. Agradeço sempre pelo apoio nos momentos mais difíceis, pelo incentivo nos estudos e no trabalho e pela eterna compreensão.

Ao Luís Alberto por todo amor, cuidado e incentivo. Agradeço ainda pela excelente companhia nos finais de semana de trabalho em casa.

Aos meus tios (Edison e Edna) e primos (Ricardo, Camila e Natália) por todo carinho e compreensão, principalmente pela minha presença acompanhada dos livros.

A todos que de alguma forma colaboraram com a elaboração desse trabalho.

Muito obrigada

RESUMO

As lâmpadas contendo mercúrio, abordadas no presente estudo, estão identificadas na PNRS como lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista e encontram-se relacionadas como um dos produtos objeto de logística reversa. Nesse cenário, a demanda por alternativas de destinação final dos resíduos estimulou o surgimento no mercado nacional de empresas que dispõem de equipamentos móveis de trituração para processamento das lâmpadas descartadas, preferencialmente por meio da utilização temporária no local de geração do resíduo. Entretanto, a finalidade de sua utilização tem sido objeto de questionamentos, em especial quanto à destinação das lâmpadas trituradas. O órgão ambiental do Estado de São Paulo tem exigido, a partir de outubro de 2014, que as lâmpadas trituradas sejam destinadas para processo de tratamento, que propicie tanto a recuperação do mercúrio como a separação dos componentes recicláveis, uma vez que a literatura alerta quanto à presença de mercúrio em sua composição. Empregando-se o procedimento normatizado e vigente no âmbito nacional para amostragem de resíduos sólidos, não é possível obter uma amostra representativa do material triturado. Consequentemente, não é possível comprovar por meio da caracterização e classificação da amostra coletada que o resíduo não apresenta toxicidade e, portanto, que seus componentes (vidro e metais) podem ser destinados diretamente à reciclagem ou para disposição final em aterro de resíduos não perigosos. Tal exigência, portanto, além de estar em consonância com a PNRS, visa assegurar a destinação ambientalmente adequada das lâmpadas trituradas e evitar a liberação de mercúrio para o meio ambiente.

Palavras-chave: mercúrio, lâmpadas fluorescentes, resíduos sólidos, destinação final ambientalmente adequada.

LISTA DE SIGLAS

ABILUX	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CADRI	Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIETEC/USP	Centro de Inovação, Empreendedorismo e Tecnologia da Universidade de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECP	Equipamento de Controle de Poluição do Ar
EQL	Equipamento Quebra-Lâmpadas
EPA	do inglês, Environmental Protection Agency
HEPA	do inglês, High Efficiency Particulate Arrestance
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMA	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SVLE	Sistema de Ventilação Local Exaustora
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Logística reversa de lâmpadas contendo mercúrio	5
3.2. Caracterização e classificação dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio.....	11
3.3. Toxicidade do mercúrio e seus compostos	14
3.4. Destinação final dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio	16
4. ESTUDO DE CASO.....	23
5. CONCLUSÃO	35
6. REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

O mercúrio é um dos metais mais estudados e sua ocorrência no ambiente é motivo de grande preocupação. Esse fato está associado aos seus efeitos tóxicos amplamente discutidos na literatura médica e toxicológica. A preocupação ambiental decorre de suas características como persistência e capacidade de se bioacumular na cadeia trófica, representando um risco para a saúde da população (CETESB, 2014).

O primeiro desastre ambiental de repercussão mundial que expôs o risco eminente do mercúrio ocorreu por volta de 1953 na Baía de Minamata, sudoeste do Japão. Encontrava-se instalada na região uma indústria química da Chisso Corporation, a qual utilizava mercúrio em seu processo produtivo, na forma de cloreto de mercúrio como catalisador na produção de cloreto de vinila, e na forma de sulfato de mercúrio como catalisador para a produção de ácido acético e seus derivados. O efluente contendo metilmercúrio, gerado na síntese do acetaldeído, era lançado no corpo hídrico, o que resultou na contaminação da biota marinha e das águas de sua vizinhança, chegando até a população por meio da ingestão de peixes e frutos do mar (MICARONI et al., 2000).

A “Doença de Minamata” foi oficialmente descoberta em 1956, quando uma criança foi hospitalizada com mãos e pés paralisados, sendo então vários casos similares encontrados, atingindo níveis epidêmicos. Desde 1953 fatos até então inexplicáveis estavam sendo observados próximo à Baía de Minamata: pessoas passaram sofrer entorpecimento de seus dedos, lábios e língua; mortes de peixes e mariscos; e mortes de pássaros e gatos com desordens nervosas. Por volta de 1960, no mínimo 111 pacientes já haviam sido identificados com a doença. A mortalidade foi cerca de 20% e os sobreviventes ficaram permanentemente incapacitados. A proporção exata deste acidente é incerta, no entanto, as estimativas mais pessimistas apontam que a Chisso lançou na baía algo em torno de 200 a 600 toneladas de metilmercúrio em seu efluente. A utilização do mercúrio na produção de acetaldeído foi interrompida em 1968. Até 1997, o número de vítimas fatais já havia chegado a 887, sendo que mais 2209 casos da “Doença de Minamata” haviam sido registrados. Somente em setembro de 1997, mais de 40 anos após a descoberta oficial do problema, foram retiradas as redes que dividiam a baía em uma área de peixes contaminados (concentração de mercúrio maior que $0,04 \text{ mg.kg}^{-1}$) e uma outra livre do metal (MICARONI et al., 2000).

A contaminação por mercúrio no Brasil mostra duas diferentes fontes deslocadas temporal e geograficamente. A primeira foi originada na indústria de cloro-soda, responsável pela principal importação de mercúrio para o país e pelas principais emissões para o meio ambiente até a década de 80. Essas emissões localizavam-se particularmente na região sul-sudeste. A partir da década de 80, o garimpo de ouro, localizado principalmente na Amazônia, tornou-se o principal comprador de mercúrio no Brasil e o responsável pela maior emissão deste poluente para o meio ambiente (CETESB, 2014).

O consumo industrial de mercúrio no Brasil caiu substancialmente a partir de 1980 em razão de uma legislação de controle mais eficiente, que resultou no banimento do uso de mercúrio em determinados setores, dentre eles o setor de defensivos agrícolas; na substituição de tecnologias, como por exemplo, a substituição das células de mercúrio na indústria de cloro-soda; e no controle mais eficiente de efluentes industriais (CETESB, 2014).

Em janeiro de 2013 em Genebra, na Suíça, a 5ª Reunião do PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente aprovou a Convenção de Minamata, tendo como objetivo proteger a saúde humana e o meio ambiente de emissões e liberações antropogênicas de mercúrio e seus compostos (CETESB, 2014). Foi assinada por 128 países, incluindo o Brasil, sendo que 13 deles já ratificaram o documento. O Brasil ainda não submeteu o processo formal de ratificação da Convenção, conforme está estabelecido na Constituição Federal. O texto entrará em vigor após ter sido ratificado por pelo menos 50 países (UNEP, 2013).

A Convenção estabelece diretrizes e obrigações relativas ao controle de fontes e comércio de mercúrio, incluindo o banimento da mineração primária da substância; às medidas para o controle e a redução de emissões e liberações de mercúrio ao meio ambiente; à eliminação ou redução do uso do mercúrio em determinados produtos e processos industriais, bem como o manejo sustentável de resíduos de mercúrio; à elaboração de planos nacionais para a redução do uso de mercúrio na mineração de ouro artesanal e em pequena escala (garimpo); e à promoção da cooperação internacional em temas relacionados à matéria, inclusive por meio de recursos financeiros a países em desenvolvimento (MMA, 2014; UNEP, 2013).

Os produtos do setor de iluminação sujeitos à proibição da manufatura, importação e exportação após 2020 são: (a) lâmpadas fluorescentes compactas com até 30 W contendo mais de 5 mg de mercúrio por lâmpada; (b) lâmpadas fluorescentes tubulares para iluminação geral com até 60 W e cobertura de trifósforo contendo mais de 5 mg de mercúrio; (c)

lâmpadas fluorescentes tubulares para iluminação geral com até 40 W e cobertura de halofosfato contendo mais de 10 mg de mercúrio; (d) lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão para iluminação geral; (e) lâmpadas de catodo frio e de eletrodo externo para *displays* eletrônicos (i) de arco curto (≤ 500 mm) com mais de 3,5 mg de mercúrio por lâmpada; (ii) arco médio (> 500 mm e ≤ 1500 mm) com mais de 5 mg; e (iii) arco longo (> 1500 mm) com mais de 13 mg de mercúrio por lâmpada (UNEP, 2013).

As restrições de uso aos produtos supracitados, de forma geral, tratam das quantidades máximas de mercúrio em diferentes tipos de lâmpadas e, portanto, para o setor de iluminação, a utilização de lâmpadas que contem mercúrio será mantida, tendo em vista sua eficiência do ponto de vista energético quando comparada às lâmpadas incandescentes (ABILUX, 2013). Além disso, sua utilização tende a aumentar, em função das políticas de banimento das lâmpadas incandescentes. Sendo assim, a estruturação de sistemas de logística reversa para os resíduos de lâmpadas que contém mercúrio, torna-se cada vez mais necessária para reverter o quadro atual de destinação inadequada das lâmpadas descartadas, principalmente a disposição final em aterros de resíduos não perigosos ou em áreas de deposição irregular de resíduos, de forma a minimizar os impactos ambientais negativos e irreversíveis ocasionados pela liberação de mercúrio no ambiente (BACILA et al., 2014).

A demanda por alternativas de destinação ambientalmente adequada das lâmpadas contendo mercúrio estimulou o surgimento no mercado nacional de empresas que dispõem de equipamentos móveis de trituração para processamento de lâmpadas descartadas, preferencialmente de utilização temporária no local de geração do resíduo. No entanto, a finalidade de sua utilização tem sido objeto de questionamentos, em especial quanto ao controle das emissões de mercúrio e quanto à destinação final dos resíduos sólidos gerados no processamento, os quais compreendem as lâmpadas trituradas e os filtros do sistema de controle de poluição do ar do equipamento.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente estudo foi realizar um levantamento sobre a ocorrência de mercúrio nos resíduos de lâmpadas trituradas após processamento em equipamentos móveis, com vistas a subsidiar discussão sobre sua destinação ambientalmente adequada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Logística reversa de lâmpadas contendo mercúrio

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, desloca o tema resíduo sólido para outro patamar, extrapolando discussões voltadas exclusivamente para formas de disposição final em aterros. O novo arcabouço legal incorpora a consciência das riquezas e potencialidades possíveis no manejo dos resíduos sólidos (FRICKE; PEREIRA, 2015).

A PNRS representa um avanço fundamental para a regulamentação do setor de resíduos sólidos no Brasil, o qual irá beneficiar todo o território nacional, por meio da regulação dos resíduos desde a sua geração à destinação final, de forma continuada e sustentável, com reflexos positivos no âmbito social, ambiental e econômico, norteando os Estados e Municípios para a gestão integrada de resíduos sólidos. Além disso, esse dispositivo legal irá promover a diminuição da extração dos recursos naturais, a abertura de novos mercados, a geração de emprego e renda, a inclusão social de catadores, a erradicação do trabalho infante-juvenil nos lixões, a destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, e a recuperação de áreas degradadas (BARTHOLOMEU et al., 2011).

As lâmpadas contendo mercúrio, abordadas no presente estudo, são identificadas na PNRS como lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, estando relacionadas como um dos produtos objeto de sistemas de logística reversa. O termo em questão foi introduzido pela PNRS, sendo definido no inciso XII do art. 3º da Lei nº 12.305/2010 como:

[...] 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, 2010b).

A definição de destinação final ambientalmente adequada é apresentada no inciso VII do art. 3º da Lei nº 12.305/2010 como:

[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à

saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. (BRASIL, 2010b).

O progresso econômico, o desenvolvimento industrial e o aumento dos níveis de consumo têm resultado na crescente geração de uma ampla variedade de resíduos. Nesse contexto, a gestão da cadeia reversa deve viabilizar o processo de reciclagem ou reaproveitamento, de maneira que grande parte dos resíduos seja reintroduzida no ciclo produtivo (BRANCO et al., 2011).

Por meio da implementação dos sistemas de logística reversa, os governos objetivam melhorar fisicamente a gestão de resíduos sólidos; transferir a responsabilidade da gestão, inclusive financeiramente, dos municípios ao setor privado; aumentar a eficiência no uso de recursos naturais pela sociedade; e ampliar a oferta de produtos sustentáveis (SÃO PAULO, 2014).

Wendenburg (2007 apud WENDENBURG, 2015) aponta que o conceito da responsabilidade do produtor em relação à gestão de resíduos tenta motivar para que este se responsabilize também pelo cumprimento de objetivos gerais da gestão de resíduos, como a prevenção e o seu aproveitamento, no desenvolvimento de produtos. Essa responsabilidade deve ser distinguida da proteção ambiental integrada ao produto que objetiva limitar ao mínimo os impactos ambientais durante a etapa de produção, podendo também se refletir ao próprio produto quando outros materiais são utilizados para evitar a geração de resíduos perigosos, ou aumentar o valor dos resíduos para seu aproveitamento.

Segundo Caixeta-Filho e Gameiro (2011), são dois os fatores que propiciam o fluxo reverso dos materiais: os incentivos econômicos e as imposições legais. Se os agentes tiveram incentivos econômicos (renda, lucro) para destinarem os materiais para reciclagem ou reutilização, eles o farão. Por outro lado, independentemente da presença do incentivo, devido à imposição legal, determinados agentes podem ser obrigados a dar destino específico aos produtos sobre os quais apresentam alguma responsabilidade. A compreensão do papel da logística reversa é, por conseguinte, fundamental para qualquer política pública ou privada de gestão de resíduos. As preocupações crescentes com a saúde humana e com o meio ambiente geram demandas e pressões sobre os órgãos públicos para que os mesmos definam regulamentações socialmente aceitas para essa gestão.

A PNRS, de acordo com o art. 33, inciso V, da Lei nº 12.305/2010, determinou que os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, dentre outros produtos previstos nesse dispositivo legal,

ficam obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010b).

Conforme Decreto nº 7.404/2010, os sistemas de logística reversa serão implementados e operacionalizados por meio dos seguintes instrumentos: acordos setoriais, regulamentos expedidos pelo Poder Público ou termos de compromisso (BRASIL, 2010a). Os acordos setoriais e termos de compromissos representam uma alternativa regulatória que traz um grande benefício de flexibilidade e possibilidade de particularização dos sistemas em cada caso específico, porém traz enormes dificuldades de se atingir o consenso e se chegar a acordos satisfatórios (SÃO PAULO, 2014).

A definição de acordo setorial é apresentada no inciso I do art. 3º da Lei nº 12.305/2010 como “ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto” (BRASIL, 2010b).

E, de acordo com o inciso XVII do art. 3º deste dispositivo legal, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos foi definida como:

[...] conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei. (BRASIL, 2010b).

Por permitir grande participação social, o Ministério do Meio Ambiente – MMA destaca que o acordo setorial tem sido adotado pelo Comitê Orientador para a Implantação de Sistemas de Logística Reversa, criado pelo Decreto nº 7.404/2010, como o instrumento preferencial para a implementação dos sistemas de logística reversa (MMA, 2015).

O acordo setorial de lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista foi assinado em 27.11.2014 e publicado em 12.03.2015. A partir deste acordo, o gerenciamento das lâmpadas descartadas, que correspondem aos “resíduos sólidos e rejeitos gerados em decorrência do ciclo de vida das lâmpadas”, deve atender as seguintes etapas: (a) entrega das lâmpadas descartadas pelos geradores domiciliares, em pontos de entrega ou por meio de coletas eventuais, devendo estar devidamente segregadas dos demais resíduos sólidos domiciliares; (b) triagem e armazenamento das lâmpadas descartadas pelos geradores não domiciliares, quando incorporados ao sistema, em recipientes específicos e/ou em pontos de consolidação (intermediário), os quais podem ser disponibilizados ou especificados pela

entidade gestora; (c) emissão de pedido de retirada pelo responsável pelo ponto de entrega ou pelo gerador não domiciliar, a ser enviado à entidade gestora; e (d) coleta e transporte das lâmpadas descartadas por empresa contratada pela entidade gestora, para um ponto de consolidação, para um reciclador ou para disposição final ambientalmente adequada, no caso de rejeitos. A entidade gestora foi definida no documento como associação civil sem fins lucrativos a ser criada de comum acordo pelas empresas signatárias e demais empresas que atuam no mercado das lâmpadas objeto deste acordo setorial, para implementação do sistema de logística reversa e administração de sua operação (BRASIL, 2015a).

Ainda conforme o acordo setorial é responsabilidade dos fabricantes e importadores, no âmbito do sistema de logística reversa das lâmpadas, dar destinação final ambientalmente adequada a todas as lâmpadas descartadas recebidas nos pontos de entrega ou de consolidação, ou eventualmente entregues em outros pontos incorporados ao sistema. A meta estabelecida foi de recebimento e destinação final ambientalmente adequada, no prazo de até 5 anos, de 20% das lâmpadas objeto deste acordo e que foram colocadas no mercado nacional em 2012 (BRASIL, 2015a).

Por sua vez, a exemplo do instrumento adotado pelo Governo do Estado de São Paulo em paralelo com as iniciativas federais, os termos de compromisso, de acordo com o previsto no art. 32 do Decreto nº 7.404/2010, poderão ser celebrados em caso de inexistência de acordo setorial ou regulamento específico ou para estabelecimento de compromissos e metas mais exigentes, devendo ser homologados pelo órgão ambiental competente do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA (BRASIL, 2010a).

Embora o Governo do Estado de São Paulo tenha considerado, após a promulgação da PNRS, que o melhor encaminhamento ao tema seria aquele realizado em nível federal, preferencialmente por acordo setorial, o Estado decidiu dar continuidade às tratativas para discussão e implementação de compromissos e metas, em função da existência de requisitos na Política Estadual de Resíduos Sólidos – PERS (SÃO PAULO, 2014), a qual foi instituída pela Lei nº 12.300/2006 e regulamentada pelo Decreto nº 54.645/2009.

No âmbito estadual, as lâmpadas contendo mercúrio foram inicialmente relacionadas na Resolução SMA nº 38/2011 como um dos produtos comercializados no Estado de São Paulo, que após consumo resultam em resíduos considerados de significativo impacto ambiental e, portanto, devem ser objeto de programa de responsabilidade pós-consumo (SÃO PAULO, 2011).

Ribeiro (2012) aponta que o conceito de responsabilidade pós-consumo, adotado por diversos países, pode ser definido como a responsabilidade dos fabricantes, distribuidores ou importadores de produtos pela gestão dos resíduos a estes associados, mesmo depois de seu consumo, salientando que este é um conceito mais amplo do que logística reversa. Enquanto esta última pretende viabilizar o retorno dos materiais ao ciclo produtivo, a responsabilidade pós-consumo irá estimular o mercado para reduzir a geração de resíduos, por meio de investimentos em inovação no projeto de produtos, redução de embalagens e otimização dos sistemas de distribuição. Em síntese, o autor considera que a logística reversa é uma das formas de se exercer essa responsabilidade, para os casos em que não foi possível evitar a geração de resíduos, a qual se refere ao primeiro nível hierárquico na gestão de resíduos sólidos.

O termo responsabilidade pós-consumo foi introduzido na legislação pelo Decreto Estadual nº 54.645/2009, que regulamenta a PERS, sendo estabelecido no art. 19 que:

[...] Os fabricantes, distribuidores ou importadores de produtos que, por suas características, venham a gerar resíduos sólidos de significativo impacto ambiental, mesmo após o consumo desses produtos, ficam responsáveis, conforme o disposto no artigo 53 da Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006, pelo atendimento das exigências estabelecidas pelos órgãos ambientais e de saúde, especialmente para fins de eliminação, recolhimento, tratamento e disposição final desses resíduos, bem como para a mitigação dos efeitos nocivos que causem ao meio ambiente ou à saúde pública. (SÃO PAULO, 2009).

Além da relação de produtos a que se refere o art. 19 do Decreto nº 54.645/2009, a Resolução SMA nº 38/2011 estabeleceu que os fabricantes e importadores deveriam apresentar à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo - SMA, no prazo de até 60 dias, proposta de implementação de programa de responsabilidade pós-consumo, com base no conteúdo mínimo especificado nesta Resolução, para análise da SMA, podendo resultar em termo de compromisso a ser celebrado com o Governo do Estado de São Paulo, nos termos da Lei Federal nº 12.305/2010 e do Decreto Federal nº 7.404/2010 (SÃO PAULO, 2011).

O formato da Resolução supracitada foi considerado inovador, pois ao invés de exigir que soluções externas sejam adotadas, determina que os fabricantes e importadores dos produtos relacionados apresentem sua proposta. Desta forma, reconhece a diversidade de situações entre os diferentes produtos e setores, valoriza o conhecimento que cada fabricante ou importador possui de seu produto e respectiva cadeia de valor, e oferece a oportunidade às empresas de apresentar as soluções que considerem mais adequadas e factíveis (CETESB, 2015a).

Em decorrência da experiência adquirida com o acompanhamento dos sistemas de logística reversa por meio dos termos de compromisso, foi promulgada em junho de 2015 a Resolução SMA nº 45, a qual revoga a Resolução SMA nº 38/2011 e define as diretrizes para o aprimoramento, implementação e operacionalização da responsabilidade pós-consumo no Estado de São Paulo, esclarecendo que a logística reversa, nos termos da PNRS, integra e operacionaliza a responsabilidade pós-consumo. Fica estabelecido neste dispositivo legal que a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo exigirá o cumprimento desta Resolução, no âmbito do licenciamento ambiental do empreendimento, como condicionante para emissão ou renovação da licença de operação, a partir das regras e metas a serem oportunamente estabelecidas por esta Companhia (CETESB, 2015a; SÃO PAULO, 2015).

Ainda sobre o tema, a CETESB apresenta, em seu sítio na internet, a relação dos produtos e embalagens que já possuem os termos de compromisso assinados. Em consulta realizada em agosto de 2015, há indicação da assinatura dos termos de compromisso para os seguintes produtos e embalagens: embalagens de produtos de higiene pessoal, perfumaria, cosméticos, de limpeza e afins; pilhas e baterias portáteis; embalagens de agrotóxicos; embalagens plásticas usadas de lubrificantes; pneus inservíveis; aparelhos de telefonia móvel celular e seus respectivos acessórios; óleos lubrificantes; óleo comestível (individual); óleo comestível (associação); baterias automotivas chumbo-ácido; filtros usados de óleo lubrificante automotivo; e embalagens de alimentos (CETESB, 2015c).

A CETESB destaca que, diferentemente dos acordos setoriais, os termos de compromisso têm validade somente para as empresas signatárias ou representadas por signatários (no caso de associações e sindicatos). Desta forma, empresas dos setores cujos produtos ou embalagens de produtos encontram-se relacionados na legislação pertinente e que não sejam signatárias ou aderentes a um dos termos de compromisso devem implementar seus sistemas de logística reversa em atendimento à legislação, a qual prevê sanções em caso de não cumprimento (CETESB, 2015c)

Segundo a SMA, a principal motivação da iniciativa estadual de implementação dos sistemas de logística reversa, sob vigência dos termos de compromisso firmados com esta Secretaria e com a CETESB, está em gerar informações práticas para alimentar as discussões federais sobre os acordos setoriais de abrangência nacional (SÃO PAULO, 2014).

3.2. Caracterização e classificação dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio

As lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, objeto de sistema de logística reversa pela PNRS, foram especificadas no respectivo acordo setorial como sendo as lâmpadas de descarga em baixa ou alta pressão que contenham mercúrio, tais como, fluorescentes compactas e tubulares, de luz mista, a vapor de mercúrio, a vapor de sódio, a vapor metálico e lâmpadas de aplicação especial (BRASIL, 2015a). A Figura 1 ilustra alguns tipos de lâmpadas contendo mercúrio disponíveis comercialmente (OSRAM, 2015e).



Figura 1 – Alguns tipos de lâmpadas contendo mercúrio disponíveis comercialmente: lâmpadas fluorescentes tubulares (A); lâmpadas de descarga de alta pressão (B); lâmpadas fluorescentes compactas (C); e lâmpadas especiais - lâmpadas com mercúrio e arco curto, para microlitografia (D) e lâmpadas com mercúrio e arco curto, longa vida (E).

As lâmpadas fluorescentes estão entre as fontes de luz mais amplamente usadas no mundo, por apresentarem elevada eficiência luminosa, vida útil longa, excelente confiabilidade e baixo consumo de energia (OSRAM, 2015b). No Brasil, a publicação da Portaria Interministerial nº 1.007/2010, que aprovou regulamentação específica para definição de níveis mínimos de eficiência energética de lâmpadas incandescentes¹ em atendimento ao disposto no art. 2º, § 2º, da Lei nº 10.295/2001, a qual por sua vez instituiu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, estimulou o consumo de lâmpadas fluorescentes compactas ao estabelecer níveis de eficiência energética tecnicamente inatingíveis pelas lâmpadas incandescentes comuns, provocando seu gradativo banimento no mercado brasileiro (BASTOS, 2011). Em comparação com as lâmpadas incandescentes convencionais, as lâmpadas fluorescentes compactas têm vida útil média até 20 vezes maior e consomem consideravelmente até 80% menos de energia (OSRAM, 2015c).

A operação das lâmpadas fluorescentes se baseia no princípio da descarga de gás de baixa pressão. O tubo de vidro dessas lâmpadas é preenchido com um gás nobre a baixa pressão e uma pequena quantidade de mercúrio. A parede de vidro é revestida com material fluorescente. Dentro do estojo, um campo elétrico se desenvolve entre dois eletrodos e a descarga de gás ocorre. O processo de descarga faz com que o vapor de mercúrio emita radiação ultravioleta. A luz visível é emitida assim que a radiação ultravioleta entra em contato com o material fluorescente. A cor da luz gerada pode variar em função da composição da mistura fluorescente. Deste modo, é possível criar lâmpadas fluorescentes para todos os tipos de aplicações (OSRAM, 2015a).

Por sua vez, o princípio de operação das lâmpadas de descarga de alta pressão consiste na produção de luz pela descarga de gás que ocorre em um tubo de arco entre dois eletrodos após a ignição. A condutividade elétrica é estabelecida pelos componentes de enchimento ionizados. Os eletrodos são alimentados em um vaso de descarga completamente vedado. Durante a descarga de gás, os aditivos (haletos metálicos) e o mercúrio são excitados pelo fluxo da corrente e emitem a energia de excitação em forma de sua radiação característica. A mistura dos diferentes componentes de radiação produz a temperatura de cor e as

¹ De acordo com o art. 1º, inciso IV, da Portaria MME/MCT/MDIC nº 1.007/2010, não fazem parte da Regulamentação os seguintes tipos de lâmpadas: incandescentes com bulbo inferior a 45 milímetros de diâmetro e com potências iguais ou inferiores a 40 W; incandescentes específicas para estufas, estufas de secagem, estufas de pintura, equipamentos hospitalares e outros; incandescentes refletoras/defletoras ou espelhadas, caracterizadas por direcionar os fochos luminosos; incandescentes para uso em sinalização de trânsito e semáforos; incandescentes halógenas; infravermelhas utilizadas para aquecimento específico por meio de emissão de radiação infravermelha; e para uso automotivo (BRASIL, 2010c).

propriedades de reprodução de cor desejadas. O mercúrio é completamente vaporizado no estado de operação. Esse princípio é empregado com diferentes metais e materiais de enchimento, resultando em diferentes tipos de lâmpadas de descarga de alta pressão, as quais incluem lâmpadas de haleto metálicas, lâmpadas de vapor de sódio, lâmpadas de vapor de mercúrio e lâmpadas de luz mista de vapor de mercúrio (OSRAM, 2015d).

Em levantamento realizado pela ABILUX – Associação Brasileira da Indústria de Iluminação, apresentado no âmbito do Grupo de Trabalho de Disposição final para resíduos de lâmpadas mercuriais do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, foram obtidas as quantidades médias de mercúrio em diferentes tipos de lâmpadas, indicadas na Tabela 1 (ABILUX, 2008). Dunmire et al. (2003 apud BRASIL, 2013) indicam que a quantidade mínima de vapor de mercúrio necessária para energizar a lâmpada é de 50 µg, valor correspondente a aproximadamente 0,5 a 2,5% do total de mercúrio contido no produto. A partir dos valores reportados na Tabela 1, essa quantidade mínima representaria o intervalo aproximado de 0,1 a 1% da quantidade total de mercúrio na lâmpada.

Tabela 1 – Quantidade de mercúrio em diferentes tipos de lâmpadas.

Tipo de lâmpada	Potência (W)	Quantidade média de mercúrio (g)
Fluorescente tubular	15-110	0,009
Fluorescente compacta	5-65	0,005
Luz mista	160-500	0,017
Vapor de mercúrio	80-400	0,032
Vapor de sódio	70-1000	0,019
Vapores metálicos	35-2000	0,045

As lâmpadas descartadas, termo adotado no acordo setorial para os resíduos sólidos decorrentes do ciclo de vida destas lâmpadas, são classificadas como resíduos perigosos – Classe I, de acordo com os critérios de classificação de resíduos sólidos estabelecidos na norma técnica ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a; BRASIL, 2015a). A norma em questão caracteriza os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente. O resíduo denominado lâmpada com vapor de mercúrio após uso consta dessa normativa em listagem de resíduos que reconhecidamente apresentam, pelo menos, uma das seguintes características de periculosidade: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. A toxicidade é a característica de periculosidade atribuída à lâmpada com vapor de mercúrio após uso, devido à presença de mercúrio em sua composição (ABNT, 2004a).

3.3. Toxicidade do mercúrio e seus compostos

O mercúrio é um poluente tóxico e ubíquo, caracterizando-se como um dos metais mais bioacumulados da cadeia alimentar. A literatura consolidou o entendimento de que o mercúrio inorgânico, ao sofrer o processo de alquilação, adquire lipossolubilidade, condição indispensável para o fácil transporte através de membranas celulares e para sua bioacumulação nos tecidos de um organismo. A capacidade das espécies inorgânicas do metal (excluindo-se o mercúrio elementar) e do metilmercúrio de reagir com ligantes intracelulares parece explicar o alto grau de acumulação desses compostos. Além disso, toda vez que um organismo contaminado por mercúrio estiver em nível inferior numa cadeia trófica, seu predador absorverá o mercúrio orgânico, mas revelará concentrações comparativamente aumentadas (AZEVEDO et al., 2001).

A exposição ao mercúrio via cadeia alimentar, principalmente para consumidores de nível trófico superior, incluindo-se o homem, é significativamente maior, uma vez que este metal apresenta alta toxicidade e capacidade de sofrer biomagnificação ao longo das cadeias tróficas (KEHRIG et al., 2011). Os autores apontam que este metal na sua forma orgânica mais tóxica, metilmercúrio, é bioacumulado em até um milhão de vezes ao longo da cadeia trófica aquática, desde a sua base (microorganismos e plâncton) até os organismos de topo (peixes predadores e mamíferos) por meio de adsorção na superfície corporal e, principalmente, pela ingestão de alimento (peixes, crustáceos e cefalópodes).

Do ponto de vista de risco à saúde humana, Azevedo et al. (2001) indicam que as mais importantes formas do mercúrio são: os vapores de mercúrio elementar e os alquilmercuriais de cadeia curta, nos quais o mercúrio pode estar ligado a um átomo de carbono de um grupo metila, etila ou propila. Portanto, de acordo com as diferentes toxicidades, propriedades físico-químicas e riscos de danos à saúde humana e do ambiente, pode-se estabelecer quatro categorias de mercúrio: o elementar, os compostos inorgânicos, os alquilmercuriais e os demais compostos orgânicos. Goyer (1995 apud AZEVEDO et al., 2001) aponta que a exposição ambiental da população geral ao mercúrio é estimada em aproximadamente 1 µg/dia pelo ar; até 2 µg/dia pela água e 20 µg/dia por meio dos alimentos, podendo, neste caso, atingir até 75 µg/dia, conforme a quantidade de peixes da dieta.

As emissões atmosféricas são a principal fonte de contaminação ambiental, seguida da contaminação da água e do solo (BRASIL, 2013). O aporte antrópico ocorre a partir das

seguintes fontes: indústrias que queimam combustíveis fósseis, produção eletrolítica de cloro-soda, produção de acetaldeído, incineradores de resíduos, polpa de papel, tintas, pesticidas, fungicidas, lâmpadas de vapor de mercúrio, baterias, produtos odontológicos, amalgamação de mercúrio em extração de ouro, entre outras (MICARONI et al., 2000).

O mercúrio liberado permanece no meio ambiente, circulando entre o ar, água, sedimento, solo e biota, onde assume diversas formas químicas. A maioria das emissões para o ar ocorre na forma do mercúrio elementar, que é muito estável podendo permanecer na atmosfera por meses ou até anos, possibilitando seu transporte por longas distâncias. O vapor de mercúrio presente na atmosfera pode se depositar ou é convertido na forma solúvel retornando à superfície terrestre nas águas da chuva, resultando em duas importantes alterações químicas. O metal pode ser convertido novamente em vapor de mercúrio e retornar à atmosfera, ou transformado em metilmercúrio, pelos microorganismos presentes nos sedimentos da água (BRASIL, 2013).

Sendo assim, a toxicidade do mercúrio está relacionada com sua forma química, sendo que os organomercuriais (especialmente os compostos de cadeia curta) são bem mais tóxicos que as formas inorgânicas deste metal. No entanto, a interconversão entre as diferentes formas nos diversos compartimentos ambientais associada a sua baixa tolerância pelos organismos vivos motivaram um grande número de estudos envolvendo seus efeitos biológicos na biota em geral, seu comportamento químico no meio ambiente, sua determinação e especiação, assim como o desenvolvimento de métodos de tratamento de seus compostos (MICARONI et al., 2000).

O mercúrio contido nas lâmpadas ocorre em duas formas químicas: mercúrio elementar na forma de vapor e mercúrio divalente adsorvido no pó fosfórico presente no tubo, nas extremidades da lâmpada ou em outros componentes (BRASIL, 2013). Rey-Raap e Gallardo (2011 apud BACILA, 2012) apontam que aproximadamente 85% do mercúrio está contido no pó fosfórico, mais de 13% na matriz de vidro e menos de 1% na forma de vapor. MOMBACH et al. (2008) mencionam estudos que sugerem a formação de óxido de mercúrio (II) devido à reação do mercúrio elementar com o oxigênio livre gerado pela decomposição dos óxidos de metais alcalinos que volatilizam na zona da descarga elétrica da lâmpada.

Durão Júnior e Windmüller (2008) destacam que as lâmpadas fluorescentes apresentam em sua composição, além do mercúrio, outros constituintes que conferem periculosidade aos resíduos gerados, a exemplo do chumbo contido na matriz de vidro e do cádmio também presente no pó fosfórico.

Ao longo do tempo, o mercúrio reage com o pó fosfórico resultando na perda de eficiência da lâmpada. O tempo médio de vida das lâmpadas, tanto de uso comercial quanto residencial, é de cerca de 2 a 5 anos e ao final de sua vida útil, a quase totalidade do mercúrio presente está sob forma divalente, o que resulta na contaminação ambiental, principalmente dos solos, quando de sua disposição final inadequada em áreas de deposição irregular de resíduos sólidos (BRASIL, 2013).

Apesar de constatada a maior eficiência energética das lâmpadas fluorescentes em relação às incandescentes, a característica de periculosidade dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio representa maior risco ao meio ambiente e à saúde do ser humano. O menor consumo de energia e a menor quantidade dos resíduos gerados são argumentos a favor do uso de lâmpadas fluorescentes. Porém, estes só podem ser considerados se a utilização em larga escala for implementada em regiões onde há políticas públicas que objetivem a destinação adequada das lâmpadas descartadas, incluindo o aprimoramento de tecnologias de descontaminação das lâmpadas, reciclagem de seus componentes e recuperação do mercúrio (SÃO PAULO, 2010).

3.4. Destinação final dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio

Conforme mencionado no item 3.1, a PNRS entende como destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos o disposto no inciso VII do art. 3º da Lei nº 12.305/2010, a saber:

[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. (BRASIL, 2010b).

As tecnologias disponíveis para descontaminação de lâmpadas descartadas, podendo incluir a separação dos componentes recicláveis e a recuperação do mercúrio, são: moagem simples, moagem com tratamento térmico, moagem com tratamento químico, tratamento por sopro e processo de solidificação (MOMBACH et al., 2008; SÃO PAULO, 2010).

A moagem simples consiste na quebra das lâmpadas em recipiente fechado com sistema de exaustão para captação do mercúrio volatilizado. O equipamento denominado Bulb

Eater®, sistema pioneiro desenvolvido pela empresa Air Cycle Corporation, consiste num moinho de lâmpadas acoplado sobre um tambor metálico com sistema de exaustão, o qual é constituído por filtro de tecido e por filtro de carvão ativado com 15% em peso de enxofre. O mercúrio liberado durante a moagem das lâmpadas ficará retido nesse sistema na forma de sulfeto de mercúrio (II). Equipamentos fixos de moagem simples podem ser adaptados a um leito vibratório seguido de uma peneira, para separação dos componentes da lâmpada (MOMBACH et al., 2008). Esse processo destaca-se pela praticidade, por ser um equipamento compacto, de fácil mobilidade e de menor custo quando comparado a outras tecnologias, porém não há remoção total do mercúrio contido nas lâmpadas (SÃO PAULO, 2010).

A moagem com tratamento térmico é o processo em operação mais usual e foi desenvolvido na década de 70 pela Mercury Recovery Technology System International AB, da Suécia (SÃO PAULO, 2010). Esse processo consiste no esmagamento das lâmpadas e na destilação do mercúrio, possibilitando sua recuperação. As lâmpadas descartadas são introduzidas em processadores para esmagamento, sendo o material triturado conduzido a um ciclone por sistema de exaustão. Os componentes maiores, tais como vidro quebrado, terminais de alumínio e pinos de latão, são separados e ejetados do ciclone, sendo então separados por diferença gravimétrica. O pó fosfórico e as partículas menores são coletados em um filtro no interior do ciclone. Por um mecanismo de pulso reverso, o pó é retirado do filtro e encaminhado para etapa de destilação, para recuperação do mercúrio (MOMBACH et al., 2008). Além de permitir a separação dos componentes recicláveis, MOMBACH et al. (2008) consideram essa tecnologia a melhor alternativa de tratamento das lâmpadas por também permitir que o mercúrio seja recuperado. Entretanto, apesar de ser considerada uma excelente alternativa, a tecnologia ainda é cara devido à pequena escala de produção (SÃO PAULO, 2010).

O processo químico, assim como o processo térmico, contempla duas etapas: esmagamento e contenção do mercúrio. A quebra das lâmpadas, no entanto, ocorre por via úmida, evitando a liberação do vapor de mercúrio para a atmosfera. O vidro e as partes metálicas são então lavados para envio à reciclagem. O efluente de lavagem contendo mercúrio e pó fosfórico é filtrado ou precipitado/filtrado para remoção do pó, o qual pode ser submetido à destilação, recuperando-se traços de mercúrio eventualmente presentes. Em seguida, o filtrado é submetido a tratamento químico com sulfeto de sódio, sulfito de sódio ou bissulfito de sódio, resultando na formação do precipitado de sulfeto de mercúrio (II),

insolúvel em água. Após nova filtração, o precipitado também pode ser submetido à destilação, para recuperação do mercúrio metálico (MOMBACH et al., 2008).

O tratamento por sopro se aplica somente a lâmpadas fluorescentes tubulares, com vistas a manter a integridade do tubo de vidro para que seja encaminhado na forma tubular à reciclagem. O processo consiste na quebra dos soquetes de alumínio das extremidades, por um sistema de aquecimento e resfriamento. Em seguida, uma corrente de ar é soprada através do tubo de vidro, promovendo o arraste do pó de fósforo contendo mercúrio. Este, por sua vez, passa por um sistema de ciclones e a corrente de ar, por filtros de carvão ativado (MOMBACH et al., 2008). Os autores destacam que esse tratamento não promove a remoção total do mercúrio contido na lâmpada, assegurando apenas que o vapor de mercúrio não seja liberado para atmosfera. A literatura aponta ainda um processo por sopro que utiliza um sistema a vácuo a alta temperatura, desenvolvido pelo Centro de Inovação, Empreendedorismo e Tecnologia da Universidade de São Paulo (CIETEC/USP), o qual promove a descontaminação esperada para posterior reciclagem dos componentes da lâmpada e será abordado no item 4 deste trabalho (SÃO PAULO, 2010).

No processo de solidificação, as lâmpadas são quebradas por via seca ou úmida e os materiais resultantes são encapsulados em concreto ou empregando-se ligantes orgânicos, para posterior disposição final em aterro (MOMBACH et al., 2008).

Micaroni et al. (2000), em seu artigo de revisão sobre compostos de mercúrio, apresentam iniciativas do setor produtivo no desenvolvimento de tratamentos específicos que alteram a forma química do mercúrio contido em lâmpadas, uma das fontes antrópicas desse elemento no meio ambiente, buscando minimizar seu impacto ambiental negativo. Os autores fazem referência às modificações desenvolvidas pela General Electric Company que envolvem a incorporação de um agente complexante orgânico ou inorgânico, e/ou um agente de controle de pH que reduz a formação de compostos de ferro trivalente e cobre divalente, os quais oxidam mercúrio elementar a formas solúveis em água, e/ou um agente oxidante na estrutura, os quais visam à redução do arraste de mercúrio quando da disposição final deste resíduo em aterro. Nesse cenário, a GTE Products Corporation desenvolveu uma modificação que envolve a inclusão de um metal (selecionado entre ferro, cobre, estanho, índio, níquel, cobalto e titânio) capaz de reduzir eletroquimicamente soluções contendo mercúrio divalente (formado na lâmpada) para mercúrio elementar quando esta é pulverizada e submetida a tratamento em solução aquosa ácida (MICARONI et al., 2000).

Ainda segundo Micaroni et al. (2000), sobre os métodos de tratamento, merece menção o fato de que a minimização, a reutilização e a reciclagem de compostos de mercúrio estão sendo cada vez mais enfatizados, seja por razões legais, econômicas ou ambientais. Desta forma, muitos dos produtos de uso doméstico contendo este metal, incluindo lâmpadas, estão tendo sua tecnologia desenvolvida de maneira a reduzir a quantidade de mercúrio utilizada ou alterar sua forma química para minimizar o seu impacto ambiental negativo.

Micaroni et al. (2000) expõem que o tratamento clássico de precipitação com sulfeto continua sendo utilizado, mas novas técnicas de tratamento vêm sendo estudadas como a fotoredução catalítica, a amalgamação com selênio e a redução eletrolítica. A dessorção térmica e a complexação vêm sendo aplicadas não só para a remediação de solos, mas também para o tratamento de resíduos contendo compostos de mercúrio. Para os organomercuriais, deve-se proceder uma oxidação ou hidrogenação antes do tratamento para remoção do mercúrio, sendo que a incineração também pode vir a ser empregada em alguns casos específicos. Já para a disposição final, apesar de aterros e encapsulamento por cimentação ainda serem utilizados, o encapsulamento por vitrificação parece ser mais recomendado, uma vez que esta técnica reduz as emissões de mercúrio para o meio ambiente e o volume a ser disposto.

Segundo Bacila et al. (2014), a destinação dos materiais oriundos dos processos de descontaminação das lâmpadas descartadas, com separação dos componentes recicláveis e recuperação do mercúrio, deve ser conduzida ao ciclo de fabricação de novas lâmpadas, quando possível pelas características de mercado da região ou então, conduzida a outros ciclos produtivos.

Nesse cenário, o pó fosfórico é um dos materiais obtidos que apresenta grande potencial de valorização, devido à presença dos elementos terras raras. O pó de fósforo, que representa 3% da composição da lâmpada, é constituído de 10 a 20% desses elementos, os quais possuem diversas aplicações como em cerâmica, fósforo, vidro, ligas metálicas, catalisadores e ímãs. As tecnologias para sua recuperação já existem, porém são pouco utilizadas. Entretanto, são esperados investimentos nessa área, devido à escassez prevista para esses elementos (BACILA et al., 2014). Barthel (2012 apud BACILA, 2012) destacam que as lâmpadas fluorescentes podem ser consideradas uma “mina urbana” para obtenção de elementos terras raras.

Ainda sobre o tema, Bacila et al. (2014) mencionam a patente da empresa Osram relacionada à recuperação de térbio, ítrio e európio de lâmpadas fluorescentes, por meio das

seguintes etapas: tratamento mecânico; separação do halofosfato; extração e digestão ácida; e precipitação. Este método permite a obtenção de óxidos de terras raras puros, sendo considerado economicamente viável e ambientalmente adequado. Outras patentes relacionadas à recuperação de elementos terras raras do material fluorescente foram depositadas pela General Electric Company. A mais recente e aprimorada contempla as etapas de queima do fósforo em meio alcalino, gerando a decomposição do fósforo em uma mistura de óxidos; de extração do resíduo da mistura e tratamento desse resíduo visando obter uma solução; e, por fim, de separação dos elementos terras raras.

Bacila et al. (2014) apontam ainda a destinação do pó de fósforo para aplicação na indústria de cerâmica e na indústria de tintas e pigmentos. Além disso, os autores destacam a possibilidade de retorno do vidro, após descontaminação das lâmpadas, para fabricação de novas lâmpadas, a exemplo do que é praticado pela Alemanha. Enquanto no Brasil, o vidro tem sido destinado para indústrias de cerâmica.

O mercúrio, por sua vez, após recuperado tem sido aplicado nos seguintes segmentos: mineração de ouro, indústria química, uso em reagentes químicos, equipamentos de medição, institutos de pesquisa, niquelação de ferro e exportação (BACILA et al., 2014).

Como um primeiro passo para a restrição do uso do mercúrio metálico, que culminará com a ratificação da Convenção de Minamata e sua futura implementação em território nacional, foi promulgada a Instrução Normativa nº 8/2015 do IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, a qual estabelece o cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais, os formulários do relatório de mercúrio metálico como instrumentos de controle para a produção, comercialização e o procedimento de solicitação de importação de mercúrio metálico por pessoas físicas ou jurídicas (BRASIL, 2015b; IBAMA, 2015).

O IBAMA destaca a relevância deste diploma na preparação do arcabouço normativo para o recepcionamento da Convenção de Minamata, a qual tem o Brasil como um dos signatários e se encontra em processo de ratificação no Congresso Nacional. Conforme mencionado no item 1 deste trabalho, a convenção traz sérias restrições ao uso do mercúrio metálico e, em alguns casos, estipula prazos para que este seja banido de processos produtivos que atualmente o utilizam como insumo e de produtos, tais como alguns tipos de lâmpadas que contém teores elevados de mercúrio em sua composição (IBAMA, 2015).

O MMA, em diagnóstico preliminar sobre mercúrio no Brasil, pondera que a coleta seletiva, a reciclagem e/ou o tratamento específico para o mercúrio presente nos resíduos do

setor eletroeletrônico, o qual incluiu lâmpadas descartadas para fins de diagnóstico, é ainda insipiente, sendo estimado, no âmbito global, que atinja menos de 10% do total de resíduos gerados. Mesmo em cidades e países onde a preocupação com esses resíduos resultou em legislação apropriada, os percentuais de coleta seletiva e específica raramente chegam a 70% do total de resíduos gerados. No caso brasileiro, a situação da coleta seletiva e de tratamento específico das lâmpadas descartadas está, provavelmente, próxima da média global (BRASIL, 2013).

Ainda segundo reportado por aquele Ministério, de acordo com levantamento feito pela ABILUX, tem-se que em 2008 foram produzidas no Brasil cerca de 48,5 milhões de lâmpadas, importadas cerca de 190 milhões de unidades e exportadas cerca de 25 milhões. Foi estimado que aproximadamente 1.800 kg de mercúrio são incorporados na comercialização brasileira anual de lâmpadas, considerando que 90% da produção é constituída de lâmpadas fluorescentes, com 8,0 mg de mercúrio elementar em média por lâmpada, e 10% de lâmpadas de vapor de mercúrio, com 18 mg de mercúrio em média por unidade (BRASIL, 2013).

Foi estimado ainda que aproximadamente 0,8 toneladas de mercúrio por ano são descartados inadequadamente no país, sob a forma de resíduos de lâmpadas, considerando que somente até 10% é destinada para descontaminação e reciclagem dos componentes; e que metade da quantidade comercializada é descartada anualmente, uma vez que o tempo de vida médio das lâmpadas é de aproximadamente dois anos. O MMA pondera ser necessário e urgente a obtenção de dados mais precisos, uma vez que as estimativas de emissão de mercúrio pelo descarte desses produtos, conforme ilustrado acima, são apenas aproximações, baseadas na quantidade de mercúrio presente nos produtos e na produção/importação total dos mesmos por unidade de tempo (BRASIL, 2013).

A estimativa apresentada por Bacila et al. (2014) revela a produção e importação de 206 milhões de lâmpadas fluorescentes em 2011 e 260 milhões de unidades em 2012. Os autores avaliam que para implementação de logística reversa das lâmpadas descartadas, de forma a assegurar sua destinação ambientalmente adequada, torna-se importante a criação de um sistema estruturado de informações sobre a produção e importação de lâmpadas contendo mercúrio, bem como para o controle da geração de resíduos.

O MMA aponta que, em função do baixo índice de coleta seletiva, as lâmpadas descartadas são encaminhadas para disposição final em aterro sanitário ou para áreas de deposição irregular de resíduos sólidos. O mercúrio contido nos resíduos dispostos é progressivamente liberado para atmosfera, contribuindo para um incremento na sua deposição

atmosférica e consequente, expansão do impacto ambiental negativo para a esfera regional. Foi salientado que mesmo em áreas onde inexitem fontes pontuais significativas de mercúrio, a disposição de resíduos sólidos urbanos resulta em níveis de contaminação ambiental similares aos verificados em áreas industrializadas (BRASIL, 2013).

Lacerda (1997) avalia que fontes difusas e geralmente não usuais de mercúrio têm substituído em importância as fontes industriais clássicas. Por exemplo, na bacia da Baía de Sepetiba, no Rio de Janeiro, a maior parte do mercúrio emitido para o meio ambiente resulta de aterros sanitários, geração de energia e produção de aço utilizando sucata como matéria-prima. Essas fontes resultam em taxas de deposição atmosférica de mercúrio na região variando entre 40 e 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$, cerca de 2 a 5 vezes maior que a deposição atmosférica esperada em áreas não contaminadas. O autor pondera ainda que as fontes supracitadas, ao contrário das indústrias emissoras típicas de mercúrio, são de difícil monitoramento e controle por parte dos órgãos ambientais competentes.

4. ESTUDO DE CASO

Antes de iniciar a abordagem sobre a ocorrência de mercúrio nos resíduos de lâmpadas trituradas após processamento em equipamentos móveis, objeto do presente estudo, cabe apontar que para fins de destinação de lâmpadas contendo mercúrio, nos termos da PNRS, encontram-se em operação no mercado nacional empresas que promovem o tratamento desses resíduos, com vistas à destinação ambientalmente adequada dos componentes recicláveis e à recuperação do mercúrio.

A título de ilustração, a empresa Apliquim Brasil Recycle, com unidades localizadas nos municípios de Paulínia (São Paulo) e Indaial (Santa Catarina), realiza a descontaminação das lâmpadas, a separação dos componentes recicláveis e a recuperação do mercúrio. O processo de tratamento de lâmpadas de descarga de baixa pressão, de forma geral, envolve as seguintes etapas: (a) ruptura controlada das lâmpadas em equipamento enclausurado e sob pressão negativa; (b) segregação dos soquetes/terminais, para posterior envio à reciclagem; (c) descontaminação do vidro por processo térmico, com remoção do pó de fósforo de sua superfície; (d) recuperação do mercúrio na forma elementar e no estado líquido, por meio de destilação. As unidades de tratamento contem sistema de controle das emissões das etapas de ruptura controlada e de separação dos componentes da lâmpada, o qual é composto por filtros de cartucho e filtro de carvão ativado (APLIQUIM, 2015).

Por sua vez, a descontaminação das lâmpadas de descarga de alta pressão é realizada pela empresa por meio da separação do bulbo interno (cápsula contendo mercúrio) dos demais componentes da lâmpada (suportes metálicos e terminais), após quebra do vidro externo. O bulbo interno segue para descontaminação por processo térmico e para recuperação do mercúrio. Os suportes metálicos e terminais são separados por meio de corte e encaminhados a indústrias de beneficiamento (APLIQUIM, 2015).

A tecnologia de tratamento em operação na empresa Tramppo Gestão Sustentável de Lâmpadas, em unidade localizada no município de Cotia (São Paulo), foi desenvolvida com o apoio do CIETEC/USP. O processo de tratamento tem início com a retirada dos terminais de alumínio. Em seguida, é realizada a limpeza do vidro e a remoção do pó fosfórico contendo mercúrio, por meio de um sistema de hélices paralelas que promovem sucção em série, de forma a garantir sua retirada total. O tubo de vidro, após descontaminação, é fragmentado em um sistema móvel de trituração, similar ao equipamento móvel a ser abordado posteriormente, restando nos tambores o vidro triturado. O pó fosfórico removido é encaminhado para um

reator, iniciando-se a etapa de separação do mercúrio. Nessa etapa, o pó fosfórico é aquecido a uma temperatura superior a 100°C e inferior a 1000°C, ocorrendo a volatilização do mercúrio, o qual é resfriado para condensação e recuperação. O equipamento tem capacidade para processamento de 120.000 lâmpadas por mês (POLANCO, 2007; TRAMPPO, 2015).

O vidro e o pó fosfórico são destinados para a indústria cerâmica. Os terminais são encaminhados para a indústria de fundição, para fins de aproveitamento do alumínio, cobre e latão. Em seu sítio na internet, não há indicação do uso do mercúrio recuperado, sendo somente informado pela empresa que o metal tem sua destinação comprovada e documentada. A Figura 2 ilustra os resíduos gerados no processo de tratamento supracitado (TRAMPPO, 2015).

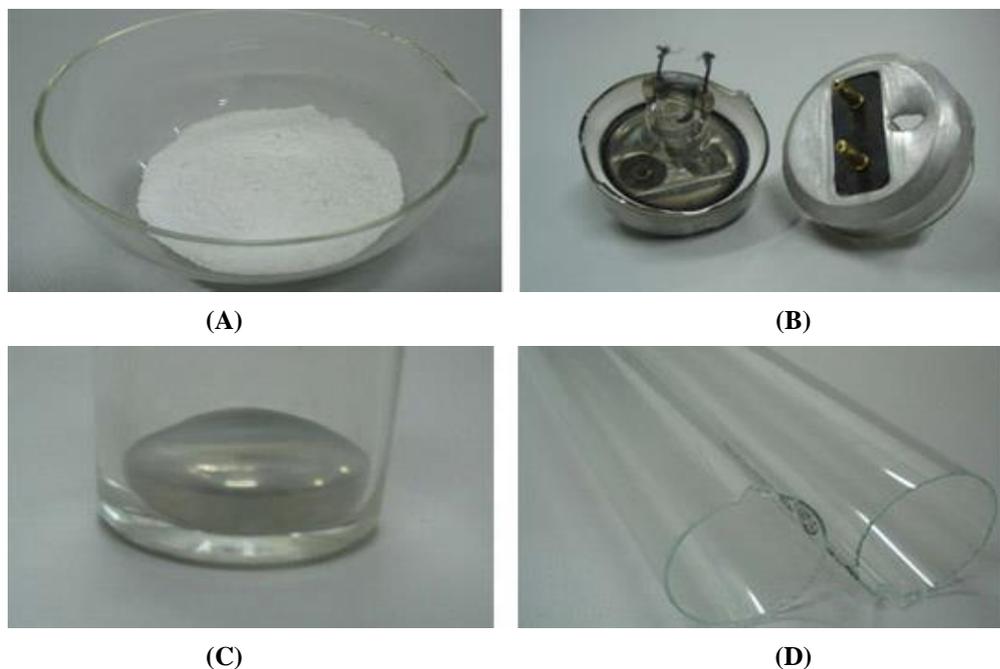


Figura 2 - Resíduos gerados no processo de tratamento de lâmpadas contendo mercúrio: pó fosfórico (A), terminais (B), mercúrio recuperado (C) e vidro (D).

A discussão sobre o uso inadequado do mercúrio recuperado tem se destacado, uma vez que o Brasil, conforme abordado anteriormente, é um dos signatários da Convenção de Minamata. Num primeiro momento, a ausência de informações específicas poderia fomentar eventuais questionamentos sobre a viabilidade ambiental da etapa de recuperação do mercúrio, a qual é parte integrante dos processos de tratamento das lâmpadas descartadas, gerando um produto a ser comercializado. Entretanto, além de estimular a destinação ambientalmente adequada de resíduos por meio da PNRS, o país dá um primeiro passo para a

restrição do uso do mercúrio metálico com a promulgação da Instrução Normativa nº 8/2015 do IBAMA, a qual estabelece os formulários do Relatório de Mercúrio Metálico como um dos instrumentos de controle para a produção, comercialização e o procedimento de solicitação de importação de mercúrio metálico por pessoas físicas ou jurídicas (BRASIL, 2015b).

Um aspecto importante para eficácia dos processos de descontaminação supracitados é assegurar que as lâmpadas descartadas estejam íntegras ao serem recebidas na unidade de tratamento. Assim sendo, torna-se fundamental que esses resíduos sejam manuseados adequadamente e acondicionados em embalagens/recipientes apropriados, de forma a evitar sua quebra durante o armazenamento e transporte.

Diante da fragilidade dessas etapas para o gerenciamento adequado dos resíduos de lâmpadas, umas das empresas supracitadas, segundo consta de seu sítio na internet, disponibiliza a seus clientes embalagens especialmente desenvolvidas para assegurar a integridade das lâmpadas no seu armazenamento e transporte (TRAMPPPO, 2015).

Outra solução encontrada pelo mercado foi a utilização, na origem (estabelecimento gerador), de equipamentos móveis de processamento de lâmpadas os quais promovem sua trituração e a retenção do mercúrio volatilizado. A finalidade de sua utilização, segundo EPA (2006), consiste em reduzir o volume e os custos dos resíduos a serem armazenados e transportados até a unidade de tratamento, assim como evitar a emissão de mercúrio decorrente do armazenamento e transporte inadequados. Essa alternativa permite que várias centenas de lâmpadas trituradas sejam armazenadas no mesmo local ocupado por 40 a 50 lâmpadas inteiras. Além de reduzir os custos de armazenamento e transporte, o custo do tratamento torna-se menor, uma vez que a quantidade de mercúrio no material triturado é inferior à encontrada nas lâmpadas inteiras, já que parte desse mercúrio se encontra adsorvida nos filtros que compõem o equipamento móvel. A Figura 3 ilustra o armazenamento das lâmpadas íntegras e das lâmpadas trituradas acondicionadas em tambor, após processamento em equipamento móvel (WATERLOO, 2015; APLIQUIM, 2014).



Figura 3 – Armazenamento das lâmpadas íntegras (A) e das lâmpadas trituradas contidas em tambor (B).

A empresa Air Cycle Corporation pioneira no desenvolvimento desses dispositivos, conforme mencionado no item 3.3 deste trabalho, ao descrever o equipamento Bulb Eater® (Figura 4) em seu sítio na internet, aponta a redução de até 50% no custo do tratamento do material triturado e de até 80% na capacidade de armazenamento. Ainda segundo apresentado pela empresa, a utilização do equipamento móvel mostra-se segura ao operador já que a taxa de emissão de mercúrio pela sua operação é de 0,001%, valor significativamente menor quando comparado à taxa de 2 a 3%, estimada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA, pela quebra acidental das lâmpadas descartadas durante seu manuseio e embalagem (AIR CYCLE, 2015).



Figura 4 – Equipamento Bulb Eater®, desenvolvido pela empresa Air Cycle Corporation.

No âmbito nacional, a título de ilustração, pode-se citar o equipamento denominado “Sistema Bulbox”, apresentado na Figura 5, o qual é produzido e comercializado pela empresa Bulbox Fabricação, do município de Curitiba, no Paraná. O equipamento é composto por um tambor de 200 litros, sistema de exaustão e filtragem em três fases, sistema eletrônico de contagem de lâmpadas, controle de vida útil de filtros e desligamento automático, sendo processadas tanto lâmpadas tubulares como compactas (BULBOX, 2015).

A empresa Naturalis Brasil, com concessionários em todo o país, por meio do projeto denominado “Operação Papa Lâmpadas in Company” atua na atividade de trituração das lâmpadas descartadas utilizando-se unidades móveis, a serem operadas no estabelecimento gerador dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio. Assim como o “Sistema Bulbox”, o equipamento denominado “Papa-Lâmpadas”, também ilustrado na Figura 5, consiste em um tambor metálico com capacidade de 200 litros, com tampa devidamente vedada. O dispositivo possui capacidade para fragmentar aproximadamente 900 lâmpadas fluorescentes tubulares. As lâmpadas são introduzidas por um tubo múltiplo de alimentação, sendo quebradas ao passarem pela tampa do tambor. Os materiais mais densos, tais como vidro e alumínio, se depositam no fundo do dispositivo, enquanto que o pó de fósforo, as partículas pequenas de vidro e o vapor de mercúrio são aspirados por tubo coletor conectado ao sistema externo de filtragem, o qual é composto por dois filtros à base de celulose, para retenção do pó de fósforo e das partículas de vidro e um filtro a base de carvão ativado, para adsorção do vapor de mercúrio. O filtro de celulose primário é substituído juntamente com o tambor cheio e o secundário, a cada dez tambores cheios. O filtro de carvão ativado, por sua vez, é substituído a cada 500.000 lâmpadas ou a cada dois anos (NATURALIS, 2015; POLANCO, 2007).

A empresa aponta ainda, em seu sítio na internet, que a atividade desenvolvida propicia a transformação, para resíduo não perigoso – Classe II, dos resíduos de lâmpadas contendo mercúrio, os quais em função da origem são classificados como resíduo perigoso – Classe I com base na norma técnica ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a; NATURALIS, 2015), conforme anteriormente discutido no item 3.2 deste trabalho. Importante destacar que, no Estado de São Paulo, a classificação do material triturado como resíduo não perigoso foi considerada, num primeiro momento, suficiente para comprovar a viabilidade ambiental de sua destinação a empresas de reciclagem ou para disposição final em aterros de resíduos não perigosos.



Figura 5 – Equipamentos denominados “Sistema Bulbox” (A) e “Papa-Lâmpadas” (B).

Em estudo conduzido pela EPA sobre o tema, três equipamentos denominados “*drum-top crusher*”, disponíveis no mercado, tiveram sua eficiência avaliada quanto à capacidade de retenção do vapor de mercúrio, com vistas a prevenir a exposição direta dos operadores e assistentes a níveis elevados de mercúrio. A operação dos dispositivos foi realizada em ambiente confinado de forma a coletar e quantificar o mercúrio liberado para atmosfera, sendo esperada que essa perda ocorra principalmente durante o procedimento de troca dos tambores quando esgotada sua capacidade de acondicionamento. Foram quantificados teores de 0,75 a 1,3 mg na superfície da estrutura de contenção instalada para os experimentos. A partir dos resultados obtidos, o estudo observa que a operação desses equipamentos representa uma nova fonte de emissão de mercúrio e, portanto, mostra-se necessário que a prática seja realizada em ambiente confinado, com sistema de ventilação local exaustora independente das demais instalações (EPA, 2006).

Para o tema em pauta, esse estudo também se destaca pela quantificação do mercúrio presente no material triturado, contido nos tambores. Embora os resultados obtidos estejam acompanhados de uma significativa incerteza, foram quantificados teores de 767 a 928 mg de mercúrio no material triturado, os quais correspondem ao intervalo de 43 a 97% do total retido no equipamento. Observa-se que o estudo considerou esse total como sendo o mercúrio retido tanto no material triturado como no sistema de controle de poluição do ar acoplado aos

tambores (EPA, 2006). Deste modo, a porcentagem de mercúrio presente nas lâmpadas trituradas foi igual ou superior à retida nos filtros que compõem o equipamento.

Os dados reportados evidenciam que o sistema de exaustão dos dispositivos analisados não é suficiente para remoção de todo o mercúrio liberado durante a operação do equipamento e, portanto, servem de alerta quanto a eventual fragilidade da atividade de trituração das lâmpadas em equipamentos móveis caso esta seja empregada como um processo de tratamento desses resíduos, visando sua descontaminação e posterior reciclagem dos seus componentes.

Nesse contexto, em 13.01.2014 o Ministério Público do Estado de São Paulo, por intermédio da Promotoria de Justiça do Meio Ambiente da Capital, instaurou inquérito civil público, determinando, dentre outras medidas, que a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo deveria:

[...] no prazo de 30 dias, informar a qualificação e endereço de todas as empresas licenciadas a operar o equipamento denominado “Bulb Eater” ou “Drum Top Crusching – DTC”, ou semelhante, indicando os números das licenças de operação e as dispensas de licenciamento desse equipamento quando utilizados em sua configuração móvel. Ainda, encaminhar cópia do parecer técnico justificando a dispensa de licenciamento. Consignar que poderão prestar outras informações que entenderem necessárias para o melhor esclarecimento do assunto. (CETESB, 2014).

Em atendimento, a CETESB apresentou o levantamento solicitado, ocasião em que esta Promotoria foi informada sobre a revisão dos procedimentos atualmente utilizados para controle da atividade de trituração das lâmpadas descartadas em equipamentos móveis, a qual foi conduzida pela equipe técnica desta Companhia (CETESB, 2014).

Por se tratar de uma fonte móvel de poluição e de utilização temporária nas instalações do gerador do resíduo ou em pontos de entrega, a atividade em questão, no Estado de São Paulo, não é passível de obtenção das Licenças Prévia, de Instalação e de Operação do empreendimento, nos termos do Regulamento da Lei Estadual n° 997/76, aprovado pelo Decreto n° 8.468/1976 e alterado pelo Decreto n° 47.397/2002 (SÃO PAULO, 1976b; SÃO PAULO, 1976a; SÃO PAULO, 2002). Entretanto, tendo em vista a necessidade de controlar a atividade de processamento de lâmpadas contendo mercúrio em equipamentos móveis, a CETESB se manifesta sobre a questão por meio do documento denominado “Parecer Técnico” (CETESB, 2015b).

A CETESB disponibiliza, em seu sítio na internet, as seguintes orientações sobre as informações a serem apresentadas quando da solicitação do “Parecer Técnico” supracitado:

[...] I. Memorial Descritivo: contendo todos os dados técnicos e operacionais do equipamento a ser utilizado, bem como as medidas de controle propostas e outros cuidados porventura adotados. (CETESB, 2015b).

[...] II. Descrição do programa de troca de filtros (Bag, HEPA e carvão ativado) com base nas especificações do fabricante, as quais deverão ser comprovadas tecnicamente (manuais ou relatórios de testes efetuados pelos fabricantes dos equipamentos para determinação da eficiência e frequência de troca de filtros). (CETESB, 2015b).

[...] III. Estimativas de quantidades e tipos de resíduos gerados (incluindo os filtros do EQL) e proposta para sua destinação (recuperação, reciclagem e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos). (CETESB, 2015b).

O documento contendo tais orientações ainda apresenta condicionantes para o Equipamento Quebra-Lâmpadas – EQL móvel, no âmbito da solicitação de Parecer Técnico relativo a sua utilização temporária no local do estabelecimento gerador dos resíduos de lâmpadas, a saber:

[...] O EQL deverá conter um contador de lâmpadas processadas. (CETESB, 2015b).

[...] A CETESB exigirá que a operação do EQL seja realizada em ambiente confinado. O local de operação deverá possuir salas limpa, cobertas, com piso e paredes revestidos internamente com acabamento liso, lavável, impermeável, afastadas das entradas e janelas de outras edificações do entorno e ainda dotada de sistema de ventilação local exaustora (SVLE), independente do resto da edificação, com equipamento de controle de poluição do ar (ECP). Alternativamente, o EQL-Móvel poderá operar em contêiner ou similar que reúna essas condições. (CETESB, 2015b).

[...] Os resíduos constituídos de lâmpadas trituradas e filtros deverão ser destinados a locais devidamente licenciados para o tratamento, de forma a possibilitar a recuperação do mercúrio e reciclagem dos metais e vidros. O gerenciamento desses resíduos será de responsabilidade do prestador de serviços e deverá ser precedido da obtenção de CADRI. (CETESB, 2015b).

As orientações e condicionantes reproduzidas acima são parte integrante dos novos procedimentos para a emissão de “Parecer Técnico” para os EQL móveis, os quais estão sendo adotados pela CETESB desde 15.10.2014. Além disso, as empresas existentes que já possuíam “Parecer Técnico” para esses dispositivos, porém emitido em desacordo com os novos procedimentos, estão sendo comunicadas para solicitar novo documento (CETESB, 2014).

Cabe destacar que a atualização dos procedimentos praticados por esta Companhia passou a exigir que o material triturado seja destinado para processo de tratamento, que propicie tanto a recuperação do mercúrio como a separação dos componentes recicláveis. Além disso, o envio dos resíduos triturados à empresa destinatária deverá ser precedido da obtenção de Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental – CADRI, pelo prestador de serviços junto à CETESB (CETESB, 2015b). Assim sendo, considera-se que fica assegurado o controle e a rastreabilidade da destinação final de resíduos que ainda podem conter mercúrio em sua composição, segundo dados da literatura.

Considera-se ainda que o posicionamento adotado pela CETESB quanto à destinação do material triturado se adequa à ordem de prioridade estabelecida pela PNRS no âmbito da gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. A Lei nº 12.305/2010, que institui esta Política, estabelece como diretriz em seu art. 9º que “na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010b). A disposição final em aterro das lâmpadas trituradas, portanto, deverá somente ser adotada por ocasião da impossibilidade de tratamento desses resíduos por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, o que não se observa para o setor. Pondera-se, porém, que caso a única forma disponível de destinação fosse a disposição das lâmpadas trituradas em aterro, haveria a necessidade de tratamento prévio desses resíduos, como por exemplo, o encapsulamento, de forma a assegurar que não ocorram emissões de mercúrio.

Conforme anteriormente apresentado e exemplificado neste item do trabalho, o mercado nacional dispõe de empresas que já promovem o tratamento das lâmpadas inteiras, com vistas à destinação ambientalmente adequada dos componentes recicláveis e do mercúrio recuperado. O recebimento e tratamento das lâmpadas na sua forma triturada exige sim investimentos e adaptações ao processo produtivo, mas que não inviabilizam técnica e economicamente sua inclusão.

Cabe apontar ainda que a Lei nº 12.305/2010, em seu art. 54, estabelece o prazo de até quatro anos após a sua data de publicação, o qual foi encerrado em agosto de 2014, para implantação da disposição ambientalmente adequada dos rejeitos. Pelo definido no inciso XV do art. 3º deste diploma legal, os rejeitos consistem nos “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” (BRASIL, 2010b). Com base no discutido no parágrafo anterior, os resíduos triturados, após processamento das lâmpadas em equipamentos móveis, não podem ser enquadrados como rejeitos e, portanto, a exigência de destinação desses resíduos para tratamento, embora válida no Estado de São Paulo somente a partir de outubro de 2014, também foi estabelecida para atendimento à legislação.

Embora não seja objeto de análise do presente trabalho, salienta-se que as considerações supracitadas ainda se aplicam à discussão sobre a destinação dos filtros que compõem o sistema de controle de poluição do ar dos equipamentos móveis, após exaurida sua vida útil. Até o momento, não se tem conhecimento de que os processos de tratamento das

lâmpadas descartadas, atualmente em operação, estejam aptos a também processar esses filtros, com a finalidade de recuperação do mercúrio presente. Considera-se, portanto, que diante da impossibilidade dessa recuperação, os resíduos de filtros ainda se enquadrariam como rejeitos, devendo ser destinados para disposição final em aterro, compatível com suas características e classificação. Com base nos critérios da norma técnica ABNT NBR 10004:2004, pela toxicidade da substância de interesse (mercúrio) e pela origem dos resíduos, é de se esperar que estes sejam perigosos e, portanto, devem ser dispostos em aterros de resíduos perigosos – Classe I. Há consenso entre as empresas de tratamento de lâmpadas descartadas quanto ao gerenciamento dos filtros como resíduos perigosos.

Outro ponto a ser abordado consiste no procedimento de amostragem do material triturado para fins de caracterização do resíduo, tendo em vista sua classificação e seu gerenciamento ambientalmente adequado.

A EPA, por meio do estudo citado anteriormente, pondera sobre as possíveis fontes de incerteza dos resultados da determinação de mercúrio no material triturado. A amostragem não-representativa e a volatilização do mercúrio durante a manipulação das amostras tanto em campo como em laboratório foram apontados como as possíveis fontes dessa incerteza. Para realização do estudo, a tentativa de coleta de amostras representativas tornou-se um desafio, uma vez que o material triturado contido no tambor se apresentava compactado, dificultando a inserção do amostrador. Além disso, o pó fosfórico contendo mercúrio, quando não aspirado pelo sistema de exaustão, tende a se depositar no fundo do tambor devido à vibração do equipamento em operação. Deste modo, sua distribuição ao longo da carga de vidro e metais triturados contida no tambor não é homogênea (EPA, 2006).

No âmbito nacional, a obtenção de uma amostra representativa do resíduo, para fins de caracterização e classificação, é orientada pela norma técnica ABNT NBR 10007:2004. Para aplicação desta normativa, a amostra representativa é definida como a “parcela do resíduo a ser estudada, obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo” (ABNT, 2004d).

Para amostragem em tambores, a norma em questão orienta quanto à realização do seguinte procedimento na coleta de amostras representativas do resíduo:

[...] 4.2.1.1 Estes recipientes devem ser posicionados de tal maneira que a sua tampa ou batoque fique para cima.

4.2.1.2 A homogeneização ou não da amostra deve estar condicionada ao objetivo do plano de amostragem [...].

NOTA 1 Caso seja necessária a obtenção de amostra com diferentes fases, o conteúdo do recipiente deve ficar descansando até que os sólidos se depositem no fundo ou as fases se estratifiquem e entrem em equilíbrio.

NOTA 2 Caso seja necessária a obtenção de uma amostra homogênea, o conteúdo do recipiente deve ser homogeneizado.

4.2.1.3 A tampa ou batoque deve ser afrouxado, vagarosamente, com uma chave própria para abertura dos recipientes, a fim de que as pressões interna e externa se equilibrem. Logo após, remover a tampa ou batoque e amostrar o conteúdo [...].

4.2.1.4 Quando existirem recipientes com diferentes resíduos, estes recipientes devem ser identificados e separados de acordo com os resíduos. Para cada grupo de resíduos deve-se obter uma amostra composta representativa. (ABNT, 2004d).

Assim como observado no estudo da EPA, considera-se que ao aplicar o procedimento recomendado por esta normativa para amostragem dos resíduos triturados em equipamento móvel, com objetivo de quantificar o mercúrio eventualmente presente, é de se esperar sua perda significativa por volatilização, principalmente na etapa de homogeneização do resíduo. A homogeneização se faz necessária para obtenção de uma amostra representativa do material triturado contido no tambor, uma vez que este é composto pela mistura de vidro, metais e pó fosfórico. Tendo em vista a volatilidade da substância de interesse e a heterogeneidade do resíduo a ser amostrado, considera-se que o procedimento recomendado na normativa vigente não é adequado ao caso em estudo. Sobre a questão, EPA (2006) ainda alerta quanto a ausência na literatura de procedimento de amostragem aplicável à coleta de uma amostra representativa das lâmpadas trituradas, para posterior quantificação do mercúrio presente.

As questões relativas ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, incluindo sua disposição final em aterro, são norteadas pela caracterização de uma ou mais amostras representativas do resíduo e pela sua classificação em resíduo perigoso – Classe I, não perigoso não inerte – Classe IIA ou não perigoso inerte – Classe IIB. O processo de classificação de resíduos sólidos é orientado pela norma técnica ABNT NBR 10004:2004, a qual caracteriza os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. De forma geral, a classificação envolve a identificação do processo ou atividade de origem do resíduo, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A classe do resíduo, por conseguinte, pode ser atribuída a partir de seu enquadramento em listagens de resíduos que reconhecidamente apresentam as características de periculosidade preconizadas na norma (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade) ou então, de sua análise laboratorial quanto à presença de alguma dessas características (ABNT, 2004a).

A substância de interesse (mercúrio) consta dessa normativa na lista de substâncias que conferem periculosidade aos resíduos e na listagem de substâncias tóxicas. A primeira listagem citada é utilizada como ponto de partida para investigação da toxicidade do resíduo e a segunda, é aplicada diretamente para enquadramento como tóxico dos resíduos constituídos por “restos de embalagens contaminadas” e por “derramamentos ou produtos fora de especificação ou do prazo de validade” que contenham a substância de interesse, independentemente de sua concentração no resíduo (ABNT, 2004a).

Por analogia à caracterização como tóxico, segundo a ABNT NBR 10004:2004, de “restos de embalagens contaminadas” e de “derramamentos ou produtos fora de especificação ou do prazo de validade” que contenham mercúrio em sua composição, o material triturado resultante do processamento de lâmpadas em equipamentos móveis poderia ser classificado como resíduo perigoso em função somente de sua origem.

A norma em questão contempla ainda limites máximos de concentração da substância de interesse nos extratos lixiviado e solubilizado do resíduo, os quais são obtidos de acordo com procedimento recomendado em normas técnicas específicas, a saber: ABNT NBR 10005:2004 e ABNT NBR 10006:2004, respectivamente (ABNT, 2004a; ABNT, 2004b, ABNT, 2004c). Com base nos resultados do ensaio de lixiviação, o resíduo pode ser caracterizado como tóxico e, portanto, perigoso. Por sua vez, os resultados do ensaio de solubilização norteiam a classificação do resíduo não perigoso, em inerte ou não inerte (ABNT, 2004a).

Entretanto, ao proceder à caracterização e classificação do resíduo com base na análise laboratorial dos extratos lixiviado e solubilizado da amostra, pondera-se não ser possível garantir a exatidão e confiabilidade dos resultados obtidos quanto à toxicidade do resíduo, uma vez que estas amostras foram coletadas segundo procedimento normatizado e praticado para resíduos sólidos (ABNT NBR 10007:2004) e, conforme discutido anteriormente, neste caso, a aplicação deste procedimento não assegura a representatividade do material amostrado. Deste modo, qualquer decisão ou ação voltada às etapas do gerenciamento do material triturado, incluindo sua disposição final em aterro de resíduos perigosos ou não perigosos, será prejudicada. Assim sendo, considera-se que a exigência de tratamento aos resíduos triturados, além de estar em consonância com as diretrizes e prazo da PNRS segundo discutido anteriormente, irá assegurar a destinação ambientalmente adequada desses resíduos.

5. CONCLUSÃO

No âmbito do sistema de logística reversa das lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, nos termos da PNRS, o cenário atual se caracteriza pelo aumento da demanda por alternativas de destinação ambientalmente adequada das lâmpadas descartadas, o qual foi impulsionado recentemente pela assinatura do acordo setorial da cadeia em questão, e apresenta tendência de crescimento nos próximos anos.

As possibilidades oferecidas pelo mercado nacional para destinação final das lâmpadas descartadas contemplam empresas que promovem o tratamento desses resíduos, o qual inclui sua descontaminação, a separação dos componentes recicláveis e a recuperação do mercúrio. A eficácia do tratamento em questão depende impreterivelmente dos cuidados no manuseio, armazenamento e transporte das lâmpadas, de forma a garantir que estas estejam íntegras ao serem recebidas na unidade de tratamento.

A literatura demonstra que a utilização de equipamentos móveis para trituração das lâmpadas descartadas, no local de sua geração, se mostra vantajosa quando aplicada à finalidade que se propõe, ou seja, para redução de volume e custo dos resíduos a serem armazenados e transportados até a unidade de tratamento, além de evitar a emissão de mercúrio decorrente de seu manuseio inadequado e consequente, quebra.

A demanda por alternativas de destinação final das lâmpadas descartadas, num primeiro momento, poderia considerar a atividade em questão como uma opção, de menor custo e mais próxima do gerador, para tratamento desses resíduos, de modo a possibilitar a reciclagem do vidro e dos metais que compõem o material triturado e evitar a liberação do mercúrio para atmosfera. Entretanto, a literatura alerta quanto à presença de mercúrio nas lâmpadas trituradas.

A inexistência, até o momento, de metodologia de amostragem que propicie a coleta de amostras representativas do material triturado, resultante do processamento das lâmpadas em equipamento móvel, conflita com a necessidade de exatidão e confiabilidade dos resultados obtidos numa eventual caracterização e classificação do resíduo. Assim sendo, em decorrência da volatilidade da substância de interesse e da heterogeneidade do resíduo a ser amostrado, não é possível, por meio da análise laboratorial da amostra coletada, comprovar que tais resíduos não apresentam toxicidade e, portanto, impossibilitando a destinação de seus

componentes (vidro e metais) diretamente à reciclagem ou para disposição final em aterro de resíduos não perigosos.

Por sua vez, é de se esperar que as lâmpadas trituradas apresentem toxicidade e, portanto, sejam resíduos perigosos, analogamente à classificação atribuída aos resíduos constituídos por “restos de embalagens contaminadas” e de “derramamentos ou produtos fora de especificação ou do prazo de validade” que contenham mercúrio em sua composição, segundo critérios da norma técnica vigente.

Nesse contexto, a exigência estabelecida pelo órgão ambiental do Estado de São Paulo de que, a partir de outubro de 2014, o material triturado deve ser encaminhado para processo de tratamento devidamente licenciado, que permita a recuperação do mercúrio e a reciclagem dos metais e do vidro, além de estar em consonância com as diretrizes e prazo da PNRS, irá assegurar a sua destinação ambientalmente adequada e deste modo, evitar a liberação de mercúrio para o meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS

ABILUX – Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. Reunião do grupo de trabalho sobre lâmpadas mercuriais do CONAMA - descarte de lâmpadas contendo mercúrio. In: 2º GT Disposição final para resíduos de lâmpadas mercuriais, 2008, São Paulo. **Abilux: Descarte de Lâmpadas contendo Mercúrio**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reunalt.cfm?cod_reuniao=1096>. Acesso em: ago. 2015.

ABILUX – Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. Tratado limita uso do mercúrio. **Informa**, ano 3, n. 21, 2013. Disponível em: <http://www.abilux.com.br/informes/021_Informa.html>. Acesso em: ago. 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004c.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004d.

AIR CYCLE Corporation. **The Bulb Eater® lamp crusher**. 2015. Disponível em: <<http://www.aircycle.com/bulb-eater-premium/>>. Acesso em: ago. 2015.

APLIQUIM Brasil Recicle. **Companhia Ambiental de São Paulo determina novas regras para o uso de trituradores de lâmpadas**. 2014. Disponível em: <<http://www.apliquimbrasilrecicle.com.br/noticias/232/companhia-ambiental-de-sao-paulo-determina-novas-regras-para-o-uso-de-trituradores-de-lampadas>>. Acesso em: ago. 2015.

APLIQUIM Brasil Recicle. **Descontaminação e reciclagem de lâmpadas fluorescentes**. 2015. Disponível em: <<http://www.apliquimbrasilrecicle.com.br/servicos>>. Acesso em: ago. 2015.

AZEVEDO, Fausto Antônio; NASCIMENTO, Elizabeth de Souza; CHASIN, Alice A. da Matta. Caderno de Meio Ambiente. Aspectos Atualizados dos Riscos Toxicológicos do Mercúrio. **TECBAHIA R. Baiana Tecnol.**, v. 16, n. 3, p. 87-104, 2001. Disponível em: <<http://www.intertox.com.br/index.php/biblioteca-digital/category/13-toxicologia?download=29:aspectos-atualizados-dos-riscos-toxicologicos-do-mercúrio>>. Acesso em: ago. 2015.

BACILA, Danniele Miranda. **Uso da logística reversa para apoiar a reciclagem de lâmpadas fluorescentes usadas: estudo comparativo entre Brasil e Alemanha**. 2012. 152 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação Meio Ambiente Urbano e Industrial; Universidade de Stuttgart; SENAI/PR, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/28134/R%20-%20D%20-%20DANNIELE%20MIRANDA%20BACILA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: ago. 2015.

BACILA, Danniele Miranda; FISCHER, Klaus; KOLICHESKI, Mônica Beatriz. Estudo sobre reciclagem de lâmpadas fluorescentes. **Eng. Sanit. Ambient.**, Edição Especial, p. 21-30, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v19nspe/1413-4152-esa-19-spe-0021.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; BRANCO, José Eduardo Holler; CAIXETA-FILHO, José Vicente. A Logística de transporte dos resíduos sólidos domiciliares (RSD). In: BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; CAIXETA-FILHO, José Vicente (Org.). **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011. cap. 2.

BASTOS, Felipe Carlos. **Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro**. 2011. 117 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/felipe_bastos.pdf>. Acesso em: ago. 2015.

BRANCO, José Eduardo Holler et al. Caracterização da logística reversa de pneus inservíveis. In: BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; CAIXETA-FILHO, José Vicente (Org.). **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011. cap. 4.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Edição extra, 23 dez. 2010, p. 1. 2010a.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, 03 ago. 2010, p. 2. 2010b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria MME/MCT/MDIC nº 1.007/2010. Aprova a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, 06 jan. 2011. 2010c.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo Setorial de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista**. 2015a. Disponível em: <<http://www.sinir.gov.br/web/guest/acordo-setorial-de-lampadas-fluorescentes-de-vapor-de-sodio-e-mercurio-e-de-luz-mista>>. Acesso em: ago. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Diagnóstico Preliminar sobre o Mercúrio no Brasil**. Brasília: MMA, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80037/Mercurio/Diagnostico%20preliminar%20do%20mercurio%20no%20Brasil_FINAL%20_2013.pdf>. Acesso em: ago. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Instrução Normativa nº 8, de 8 de maio de 2015. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, 11 maio 2015, Seção 1, p. 75. 2015b.

BULBOX. **O sistema Bulbox**. 2015. Disponível em: <<http://bulbox.com.br/abulbo/>>. Acesso em: ago. 2015.

CAIXETA-FILHO, José Vicente; GAMEIRO, Augusto Hauber. Entendendo a logística. In: BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; CAIXETA-FILHO, José Vicente (Org.). **Logística ambiental de resíduos sólidos**. São Paulo: Atlas, 2011. cap. 1.

CETESB (São Paulo). **Contaminação por mercúrio no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/home/wp-content/uploads/sites/11/2015/06/relatorio-contaminacao-mercurio-estado-sp-2014.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

CETESB (São Paulo). **Logística Reversa no Estado de São Paulo**. 2015a. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/>>. Acesso em: ago. 2015.

CETESB (São Paulo). **Parecer Técnico para equipamento quebra-lâmpadas móvel**. 2015b. Disponível em: <<http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/documentos/lampadas.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

CETESB (São Paulo). **Processo Nº MP 01/01042/2014**. Falha e/ou inexistência de licenciamento por parte da CETESB para as atividades de trituração de lâmpadas de vapor de mercúrio com utilização do equipamento denominado “Bulb Eater” ou Drum Top-Crushing-DTC”. 2014. Consulta ao processo em: 27 jul. 2015.

CETESB (São Paulo). **Termos de compromisso de logística reversa**. 2015c. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/termos-de-compromisso-de-logistica-reversa/>>. Acesso em: ago. 2015.

DURÃO JÚNIOR, Walter Alves; WINDMÖLLER, Cláudia Carvalhinho. A Questão do mercúrio em lâmpadas fluorescentes. **Química Nova na Escola**, n. 28, 2008. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc28/04-QS-4006.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

EPA - Environmental Protection Agency. **Mercury lamp drum-top crusher study**. 2006. Disponível em: <<http://www.epa.gov/wastes/hazard/wastetypes/universal/drumtop/>>. Acesso em: ago. 2015.

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Apresentação. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.) **Gestão sustentável de**

resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Publicada Instrução Normativa sobre uso de mercúrio.** Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/publicada-instrucao-normativa-sobre-uso-de-mercuro>>. Acesso em: ago. 2015.

KEHRIG, Helena A. et al. Bioconcentração e biomagnificação de metilmercúrio na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro. **Quím. Nova**, v. 34, n. 3, p. 377-384, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n3/03.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

LACERDA, L. D. Contaminação por mercúrio no Brasil: fontes industriais vs garimpo de ouro. **Quím. Nova**, v. 20, n. 2, 1997. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v20n2/4934.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

MICARONI, Regina Clélia da Costa Mesquita; BUENO, Maria Izabel Maretti Silveira; JARDIM, Wilson de Figueiredo. Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. **Quím. Nova**, v. 23, n. 4, p. 487-495, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422000000400011>. Acesso em: ago. 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Brasília sedia encontro de ratificação da convenção sobre mercúrio.** 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php/comunicacao/agencia-informma?view=blog&id=456>>. Acesso em: ago. 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Logística Reversa.** 2015. Disponível em: <<http://sinir.gov.br/web/guest/logistica-reversa>>. Acesso em: ago. 2015.

MOMBACH, Vera Lúcia; RIELLA, Humberto Gracher; KUHNEN, Nivaldo Cabral. O estado da arte na reciclagem de lâmpadas fluorescentes no Brasil: parte 1. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 5, n. 1/2, 2008. Disponível em: <<http://bell.unochapeco.edu.br/revistas/index.php/acta/article/view/225>>. Acesso em: ago. 2015.

NATURALIS Brasil. **Papa-lâmpadas**. 2015. Disponível em: <http://www.naturalisbrasil.com.br/papa_lampadas.asp>. Acesso em: ago. 2015.

OSRAM. **Descarga de gás de baixa pressão para lâmpadas fluorescentes e lâmpadas fluorescentes compactas**. 2015a. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/lampadas-fluorescentes/conhecimento-profissional/descarga-de-gas-de-baixa-pressao/index.jsp>. Acesso em: ago. 2015.

OSRAM. **Lâmpadas fluorescentes**: visão geral do conhecimento profissional. 2015b. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/lampadas-fluorescentes/conhecimento-profissional/index.jsp>. Acesso em: ago. 2015.

OSRAM. **Lâmpadas fluorescentes compactas da OSRAM**: níveis altos de economia de energia e eficiência de custo superior. 2015c. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/lampadas-fluorescentes-compactas/index.jsp>. Acesso em: ago. 2015.

OSRAM. **O princípio da operação**: gerando luz através da descarga de gás. 2015d. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/lampadas-de-descarga-de-alta-pressao/conhecimento-profissional/principios-de-operacao-da-lampada-de-descarga-de-alta-pressao/index.jsp>. Acesso em: ago. 2015.

OSRAM. **Produtos**: lâmpadas. 2015e. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/produtos/>. Acesso em: ago. 2015.

POLANCO, Sara Leonor Cambeses. **A situação da destinação pós-consumo de lâmpadas de mercúrio no Brasil**. 2007. 119 p. Dissertação (mestrado) – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá, Programa de Pós-graduação Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, São Caetano do Sul. 2007. Disponível em: <<http://maua.br/files/dissertacoes/a-situacao-da-destinacao-pos-consumo-de-lampadas-de-mercurio-no-brasil.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Reforma da regulação ambiental: características e estudos de caso do estado de São Paulo**. 2012. 241 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Eletrotécnica e Energia,

Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: ago. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, Seção I, 09 set. 1976. 1976a.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 47.397, de 4 de dezembro de 2002. Dá nova redação ao Título V e ao Anexo 5 e acrescenta os Anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, Seção I, 05 dez. 2002, p. 3. 2002.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 54.645, de 5 de agosto de 2009. Regulamenta dispositivos da Lei nº 12.300 de 16 de março de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, Seção I, 6 ago. 2009. 2009.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 997, de 31 de maio de 1976. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, 01 jun. 1976, p. 1. 1976b.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SMA nº 38, de 02 de agosto de 2011. Estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo impacto ambiental, para fins do disposto no artigo 19, do Decreto Estadual nº 54.645, de 05.08.2009, que regulamenta a Lei Estadual nº 12.300, de 16.03.2006, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, Seção I, 03 ago. 2011, p. 46-47. 2011.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SMA nº 45, de 23 de junho de 2015. Define as diretrizes para implementação e operacionalização da responsabilidade pós-consumo no Estado de São Paulo, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, Seção I, 24 jun. 2015, p. 43. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Logística Reserva**. São Paulo: SMA, 2014. (Série Cadernos de Educação Ambiental, 20). Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/cea/files/2014/11/caderno-20-logistica-reversa.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos**. São Paulo: SMA, 2010. (Cadernos de Educação Ambiental, 6). Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/publicacoes/sma/6-ResiduosSolidos.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

TRAMPPO Gestão Sustentável de Lâmpadas. **Tecnologia Tramppo**. 2015. Disponível em: <<http://www.tramppo.com.br/index2.php?local=43>>. Acesso em: ago. 2015.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Minamata convention on mercury**. 2013. Disponível em: <<http://www.mercuryconvention.org/Convention/tabid/3426/Default.aspx>>. Acesso em: ago. 2015.

WATERLOO Brasil Consultoria Ambiental. **Nossos Serviços**. 2015. Disponível em: <<http://waterloo.com.br/wp/nossos-servicos/auditoria-e-consultoria/>>. Acesso em: ago. 2015.

WENDENBURG, Helge. A eficiência dos recursos e gestão da reciclagem: implementação na Alemanha. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.) **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.