



IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À LOGÍSTICA REVERSA DE LÂMPADAS FLUORESCENTES

ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM FLUORESCENT LAMPS REVERSE LOGISTICS

Fernando Rodrigues da Silva¹

Resumo

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabeleceu a obrigatoriedade de implantação de sistemas de logística reversa para lâmpadas fluorescentes pós-uso, imputando a responsabilidades aos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores. Considerando-se os riscos ambientais associados às lâmpadas fluorescentes, verifica-se a necessidade de aprofundamento de estudos sobre o tema. Neste contexto o presente trabalho pretende contribuir analisando os impactos ambientais potenciais associados ao sistema de logística reversa de lâmpadas fluorescentes.

Palavras-chave: Logística Reversa; Política Nacional de Resíduos Sólidos; Lâmpadas Fluorescentes; Mercúrio.

¹ Possui graduação em Engenharia Química (2000) e Especialização em Gestão Ambiental (2007) pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é professora do Centro Universitário Senac e sócio fundador da Via Sapia Treinamentos e Consultoria. E-mail: fernando.rsilva@sp.senac.br



Abstract

The National Solid Waste Policy established the mandatory implementation of reverse logistics systems for post-use fluorescent lamps, imputing liability to manufacturers, importers, distributors, retailers and consumers. Considering the risks of fluorescent lamps, there is a need for further studies on the topic. In this context, the present work aims to contribute analyzing the potential environmental impacts associated with reverse logistics system of fluorescent lamps.

Key words: Reverse Logistics; National Policy on Solid Waste; Fluorescents Lamps; Mercury.

1. Introdução

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12305/2010, busca dividir as responsabilidades pela destinação ambientalmente adequada entre toda a sociedade, incluindo fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, consumidores, titulares de serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos e o poder público em geral.

A lei ainda faz uma distinção importante entre “resíduo sólido” e “rejeito”. De acordo com a Lei, resíduos sólidos são todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade. São exemplos de resíduos sólidos os agrotóxicos, as pilhas e baterias, os pneus, os óleos lubrificantes e suas embalagens, as lâmpadas fluorescentes e os produtos eletroeletrônicos. Já rejeito é todo resíduo sólido 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. Este conceito é importante porque a Lei 12.305 determina que somente os rejeitos possam ser descartados em aterros sanitários. (APLIQUIM, 2013).

No caso das lâmpadas fluorescentes, apenas cerca de 6% de seus subprodutos são considerados rejeitos e podem ser destinados em aterros. Já os seus principais subprodutos, como o vidro, o alumínio e outros componentes metálicos, o pó fosfórico,



os componentes eletrônicos e o mercúrio são considerados resíduos e, portanto, obrigatoriamente devem ser tratados e reciclados. (APLIQUIM, 2013).

Dessa forma, torna-se de grande importância controlar o manejo das lâmpadas fluorescentes após seu consumo, evitando a contaminação do solo, das águas e o contato do homem com esse material. Esse resíduo merece cuidados especiais quanto aos procedimentos de manuseio (retirada/coleta), acondicionamento, transporte, armazenagem e destinação final (OLIVEIRA et. al, 2012).

Por esta lei, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de lâmpadas fluorescentes deverão 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. A logística reversa será implementada progressivamente segundo cronograma estabelecido em regulamento.

Para a lei, logística reversa é um 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

Da mesma forma, a lei também responsabiliza o consumidor, que deve descartar o produto corretamente. Se as lâmpadas estiverem bem cuidadas, é possível empregar o vidro, o alumínio e o mercúrio na fabricação de outros produtos. Mas se estiverem quebradas e, conseqüentemente, contaminadas, não podem ser reaproveitadas (IDEC, 2012).

Para cumprimento da legislação, a Abilux e a Associação Brasileira de Importadores de Produtos de Iluminação (Abilumi) estão se reunindo desde 2011 para discutir o assunto. Agora, as empresas que elas representam aguardam a publicação de um edital do governo para que possam apresentar sua proposta a um comitê formado por vários ministérios, como o de Minas e Energia (MME) e o de Meio Ambiente (MMA). A proposta aprovada será, em seguida, colocada em consulta pública. (IDEC, 2012)

A partir daí, o setor terá seis meses para estabelecer os pontos de recolhimento das lâmpadas descartadas. A estimativa da Abilux é de que sejam instalados, ao fim de quatro anos, mais de 8 mil pontos em todo o país. (IDEC, 2012)

Cabe ressaltar, ainda que a Lei 12.305 deixou claro o conceito de corresponsabilidade do gerador, ao definir, em seu artigo 27, parágrafo 1º, o seguinte: “A



contratação de serviços de coleta, armazenamento, transporte, transbordo, tratamento ou destinação final de resíduos sólidos, ou de disposição final de rejeitos, não isenta as pessoas físicas ou jurídicas da responsabilidade por danos que vierem a ser provocados pelo gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos”.

Assim, não apenas o gerador de uma lâmpada queimada deve tomar os cuidados necessários para que seja descartada corretamente, como deve tomar os cuidados necessários para que o destino desta lâmpada não causa impactos ambientais. Para que os órgãos envolvidos possam selecionar as opções menos impactantes, devem conhecer as opções existentes para acondicionamento, transporte e destinação das lâmpadas.

Importe ressaltar, no caso das lâmpadas fluorescentes, que não apenas a PNRS impõe obrigações sobre a coleta e destinação destes resíduos pós-consumo, como ainda a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, através de sua norma NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação, em sua revisão de 2004, incluiu as lâmpadas contendo mercúrio no Anexo A desta norma, sob o código “F044 - Lâmpada com vapor de mercúrio após o uso”. Assim a partir de 2004, no Brasil, lâmpadas fluorescentes pós-uso passaram a ser consideradas resíduos perigosos, obrigatoriamente necessitando passar por tratamentos físico-químicos para serem neutralizados, destruídos por incineração ou destinados a aterros, em acondicionamentos especiais.

A logística reversa das lâmpadas, porém, por envolver um material frágil contendo uma substância agressiva ao meio ambiente (o mercúrio), deve não somente primar por criar uma rede de coleta e transporte das lâmpadas para destinação adequada, mas também garantir que os impactos ambientais nesta rede sejam minimizados. Nesta linha, este estudo pretende, com base em consulta em livros, jornais, revistas, periódicos, boletins técnicos, trabalhos acadêmicos e sites na internet, avaliar os impactos ambientais potenciais nas etapas da logística reversa de lâmpadas.

2. Mercúrio – Poluente Global

Lâmpadas fluorescentes são mais econômicas que as lâmpadas incandescentes, uma vez que geram uma maior intensidade de luz por energia elétrica consumida. Sob esta ótica, as lâmpadas fluorescentes são menos impactantes ao meio ambiente, por propiciarem menor consumo de energia com o avanço do desenvolvimento.



Por outro lado, elas contém mercúrio como item fundamental ao seu funcionamento. O mercúrio é o mais volátil de todos os metais, e na forma de vapor é altamente tóxico. Se o mercúrio for usado em ambientes fechados, é preciso uma ventilação adequada, já que a pressão de vapor de equilíbrio do mercúrio é centenas de vezes maior que a exposição máxima recomendada.

O mercúrio é o único elemento metálico líquido à temperatura ambiente, sendo bastante raro, sendo encontrado na forma de um mineral, o cinábrio, principalmente no leste europeu, na Espanha, México e Argélia. (MMA, 2010). Seu ponto de fusão de $-38,87^{\circ}\text{C}$ (graus Celsius), e o ponto de ebulição de $356,58^{\circ}\text{C}$. Possui ainda uma densidade elevada (13,55 g/ml, à 20°C), e elevada pressão de vapor.

O mercúrio existe em três formas diferentes: elementar, inorgânica e orgânica. (MUÑOZ, 2002)

Os compostos inorgânicos são associados a danos à saúde, porém são os compostos orgânicos as formas mais tóxicas e as que passam na cadeia alimentar. O mercúrio pode ser absorvido por animais aquáticos na forma de metil mercúrio e etil mercúrio. (MUÑOZ, 2002)

O próprio mercúrio líquido não é altamente tóxico por ingestão, sendo excretada a maior parte da quantidade ingerida, porém o maior perigo é com relação ao vapor quando inalado.

O mercúrio difunde-se dos pulmões para a corrente sanguínea, e depois atravessa a barreira sangue-cérebro para penetrar no cérebro; o resultado é um grave dano ao sistema nervoso central, que se manifesta por dificuldades na coordenação, na visão e no sentido do tato. (BAIRD, 2002).

O conhecimento do mercúrio como agente tóxico e poluidor, porém, é relativamente recente na história humana. Na verdade, ao longo da história este elemento químico, e seus compostos, foram altamente valorizados (LANE, 2010). Desde a pré-história, por exemplo, utilizou-se um composto de mercúrio chamado sulfeto de mercúrio, popularmente conhecido como cinábrio, como pigmento para pinturas em paredes, tecidos, metais e mesmo pinturas de rosto. O cinábrio possui uma cor vermelho intensa, que atraía nossos antepassados com suas possibilidades de pintura. (LANE, 2010)

O mercúrio foi muito usado, também, como medicamento. Na Europa, era usado topicamente para o tratamento de infecções em ferimentos. Sais à base de mercúrio eram



usados por soldados antes mesmo das primeiras cruzadas, e serviam como adstringentes e antissépticos. Posteriormente, esses mesmos sais eram utilizados para tratar feridas de sífilis. (LANE, 2010)

Durante a idade média, com o crescimento da alquimia, o mercúrio passou a ter papel de destaque em pesquisas. Como é líquido à temperatura ambiente, não era considerado um metal inicialmente. Sua elevada afinidade com metais como ouro, cobre, prata e estanho levaram os pesquisadores a acreditar que o mercúrio era um ingrediente ativo destes metais – o que levou à base teórica de que seria possível transformar-se ferro em ouro. (LANE, 2010)

No século XVI, o mercador de Sevilha Bartolomé de Medina desenvolveu um método de amalgamação de prata usando mercúrio, com menor uso de energia e com isto facilitando a obtenção de prata. O uso do mercúrio, neste processo, reduzia a necessidade de uso de calor, salvando as florestas do entorno das minas no processo. (LANE, 2010)

O uso do mercúrio na obtenção de metais como prata e ouro já era conhecido, mas as etapas do método desenvolvido por Bartolomé de Medina reduziram parcialmente os impactos ambientais associados. Por outro lado, resultaram na emissão de grandes quantidades de vapor de mercúrio no meio ambiente. O mercúrio continuou a ser usado em minerações ao longo da história (como na corrida do ouro da Califórnia, no século XIX, e em Serra Pelada, no Brasil, no século XX). (LANE, 2010)

Contribuições antrópicas para a emissão de mercúrio no meio ambiente intensificaram-se após a primeira revolução industrial, quando o mercúrio passou a ser utilizado em lâmpadas, baterias, termômetros, barômetros, pesticidas e tintas. Como outras fontes de liberação deste metal, pode-se ainda citar a queima de combustíveis fósseis, incineração de resíduos, extração de ouro, uso de amálgama dentário e fornos crematórios. (FADINI, 1999)

O risco ambiental representado pelo mercúrio começou a despertar atenção nos anos 50, especialmente com a contaminação da Baía de Minamata, no Japão, onde uma indústria, a Chisso, que utilizava esse metal como catalisador, atirou com displicência, durante anos, resíduos do metil mercúrio nas águas. Essa é a forma química mais tóxica do mercúrio. A intoxicação, que ficou conhecida como Doença de Minamata, afetou pelo menos 2.252 pessoas, com 1.043 mortes. (WEISS, 1996)

Em seguida ao acidente de Minamata, seguiram-se constatações de biomagnificação de fungicidas mercuriais utilizados como preservantes em grãos na

Europa e América do Norte. Esses grãos, consumidos por pássaro e pequenos mamíferos, atingiram predadores maiores como águias, falcões e corujas. Mas a contaminação não ficou apenas nos animais. Ainda nos anos 60, agricultores e seus familiares que consumiram grãos tratados com fungicidas à base de metil e, especialmente pelo consumo de pão caseiro, também foram afetados.

Apenas no Iraque, os dados demonstram que 6 mil pessoas morreram vítimas dessa forma de intoxicação no início da década de 70. Como resultado desses acidentes, os governos começaram a controlar as emissões do mercúrio decorrentes da ação do homem. As emissões de mercúrio na atmosfera caíram de 10 mil a 30 mil toneladas na década de 70 para apenas 1 mil e 6 mil na década seguinte. (FADINI, 1999)

As transformações do mercúrio no meio ambiente envolvem uma série de reações químicas complexas denominadas de Ciclo do Mercúrio. A ligação entre o ciclo biológico e atmosférico é feita pela deposição de formas de mercúrio (Figura 01).

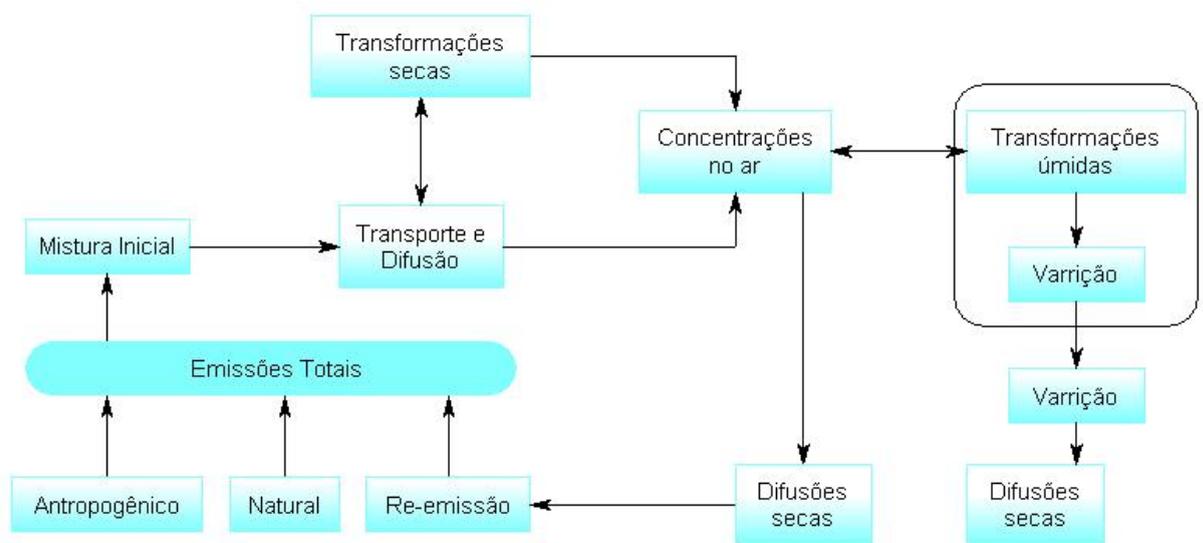


Figura 01 - Ciclo Atmosférico por Deposição de Mercúrio Fonte: MATSUYAMA, 1999

Há dois possíveis tipos de emissões de mercúrio para o meio ambiente: as naturais (provenientes de emanações vulcânicas, gaseificação, etc.) e as emissões antropogênicas (oriundas de atividades humanas, tais como fábricas, garimpos, mineração, etc.). (SILVA, 2003)



Quando o mercúrio é lançado na atmosfera, os vapores agressivos ao ser humano tendem a se precipitar sobre solo e água. (SILVA, 2003)

Quando o mercúrio atinge o solo, pode fixar-se em matérias orgânicas (plantas, microorganismos, insetos). Também pode se reduzir a sais ou formas orgânicas (extremamente perigosas). Condições especiais como a presença de substâncias húmicas, incidência de luz e pH levemente ácido favorecem a redução do mercúrio, que volatiliza-se e reentra na atmosfera. (SILVA, 2003)

Quando atinge corpos d'água, o mercúrio interage com compostos químicos e microorganismos transformando-se em metil-mercúrio com facilidade (a metilação do mercúrio é o passo mais importante para sua entrada na cadeia alimentar de organismos aquáticos, maiores bioconcentradores deste metal). (SILVA, 2003)

Apesar de sua periculosidade, o mercúrio está amplamente difundido na sociedade através de lâmpadas fluorescentes, capacitores, termômetros, amálgamas dentários, etc. O risco associado à utilização do mercúrio é muito alto e a grande maioria da população não está informada de procedimentos adequados de segregação e destinação. Desta forma, o mercúrio contido em materiais diversos chega a aterros não apropriados para receber resíduos perigosos e isso possibilita a contaminação difusa de solos e recursos hídricos e a assimilação deste metal pela fauna e flora.

Nos últimos anos houve tão considerável aumento da quantidade de mercúrio decorrente da manipulação humana, que vários órgãos e entidades têm chamado a atenção sobre os riscos para a humanidade e se mobilizado para promover a redução/eliminação de seu uso. (ZAVARIZ, 2007).

Em fevereiro de 2003, o Conselho de Governo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP/PNUMA concluiu, com base em estudos elaborados por especialistas em contaminação ambiental por mercúrio, que existem evidências suficientes e significativas dos impactos globais adversos para a saúde e para o meio ambiente causados pelo mercúrio e seus compostos, que requerem ações mundiais, nacionais, regionais e locais, recomendando que cada país estabeleça metas e adote medidas de redução/eliminação das fontes antropogênicas de mercúrio. (ZAVARIZ, 2007)

Na 24ª Reunião do Conselho Governamental do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, ocorrida em Nairobi, em fevereiro de 2007, foi reafirmada a necessidade urgente de ações internacionais em função dos efeitos adversos do mercúrio



sobre o meio ambiente, à vida selvagem e à saúde humana e considera como prioritário para a redução dos riscos, ações efetivas de eliminação do seu uso, onde já for possível e redução/eliminação de emissões atmosféricas de mercúrio originado pela ação humana e o encontro de soluções ambientalmente sólidas para conter as perdas de mercúrio e seus compostos, bem como, soluções para estocagem e redução do suprimento para a demanda global de mercúrio.

Na 25ª Reunião do Conselho Governamental do PNUMA, foi estabelecido o “UNEP Global Mercury Partnership”, como um dos principais mecanismos para a execução de ações imediatas como relação ao mercúrio. O objetivo global do UNEP Global Mercury Partnership é a proteção da saúde humana e do ambiente global da liberação de mercúrio e seus compostos, através da minimização e, onde possível, da eliminação das emissões antropogênicas de mercúrio no ar, solo e águas.

A Partnership possui atualmente 8 prioridades de ação, relativas às maiores categorias de emissões. São elas:

- Redução de mercúrio em minerações artesanais e de pequena escala
- Controle de mercúrio na combustão de carvão
- Redução de mercúrio no setor de cloro e soda
- Redução de mercúrio em produtos
- Pesquisas sobre transporte e destino de mercúrio no ar
- Gerenciamento de Resíduos Mercuriais
- Fornecimento e armazenamento de mercúrio
- Proposição de plano de negócios para mercúrio oriundo da indústria de cimento

As lâmpadas fluorescentes de alta pressão são abordadas em dois destes tópicos: Redução de mercúrio em produtos, e Gerenciamento de Resíduos Mercuriais.

No Brasil, em 23 de março de 2011, a Comissão Nacional de Segurança Química (CONASQ) instituiu o Grupo de Trabalho sobre Mercúrio (GT-Mercúrio), que tem como objetivo discutir e propor estratégias, diretrizes, programas, planos e ações sobre o Instrumento Global Juridicamente Vinculante sobre o Mercúrio e encaminhar sugestões,

no que for pertinente, para a participação brasileira na negociação do instrumento juridicamente vinculante sobre o mercúrio. O GT-Mercúrio, conforme o Termo de Referência, se reúne regularmente a cada 2 meses desde o dia 8 de junho de 2011, data da 1ª reunião. (MMA, 2013).

3. Uso de Mercúrio em Lâmpadas Fluorescentes

O funcionamento de uma lâmpada fluorescente baseia-se em 3 etapas básicas:

- O ocorrência de uma descarga elétrica no interior do tubo, que excita os átomos de mercúrio metálico, presentes no interior da lâmpada sob a forma de vapor;
- A liberação da energia acumulada pelos átomos de mercúrio excitados, sob a forma de radiação ultravioleta;
- A conversão da radiação ultravioleta em luz visível, pelo fenômeno da fluorescência.

Uma lâmpada fluorescente tubular é chamada de lâmpada fluorescente de baixa pressão (ANDRÉ, 2004). Ela é composta, basicamente, por um tubo de vidro recoberto internamente por pós de fósforo que são compostos por halofosfato de cálcio $[\text{Ca}_5(\text{F},\text{Cl})(\text{PO}_4)_3:\text{Sb},\text{Mn}]$. Entre o vidro e esta cobertura de fósforo, existe ainda um pré-revestimento de alumina (JUNIOR, 2008).

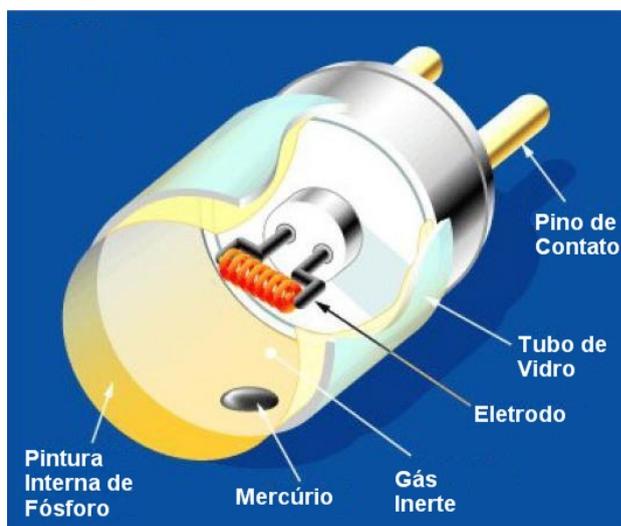


Figura 02: Perfil de uma lâmpada fluorescente. Fonte: Cosine, 2008.

Nas duas extremidades da lâmpada, são instalados eletrodos, construídos em tungstênio ou aço inoxidável, como mostra a figura 03, ilustrando o lado esquerdo da lâmpada. Finalmente, o interior do tubo, que se encontra em vácuo parcial (0,003 atm), encontra-se uma mistura gasosa constituída por um gás inerte (tal como argônio, neônio, criptônio e/ou xenônio), e vapor de mercúrio. (JUNIOR, 2008)

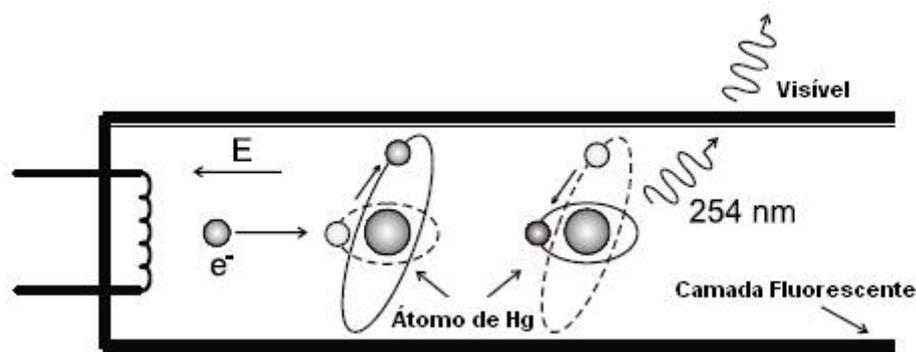


Figura 03: Princípio de Funcionamento de uma lâmpada Fluorescente tubular.

Fonte: Bakker, 2000.

Devidamente instalada e conectada à rede elétrica, uma lâmpada construída com estas características está pronta para gerar luz. Como descreve JUNIOR (2008), isso acontece, inicialmente, pela formação de uma descarga elétrica no interior do tubo. A passagem de uma corrente elétrica pelo cátodo (um dos dois terminais presentes nas extremidades da lâmpada), provoca um pequeno aquecimento. Como o cátodo é recoberto por um material emissivo especial, ocorre então emissão de elétrons no interior do tubo, partindo do cátodo e se dirigindo para o ânodo (o outro terminal elétrico da lâmpada).

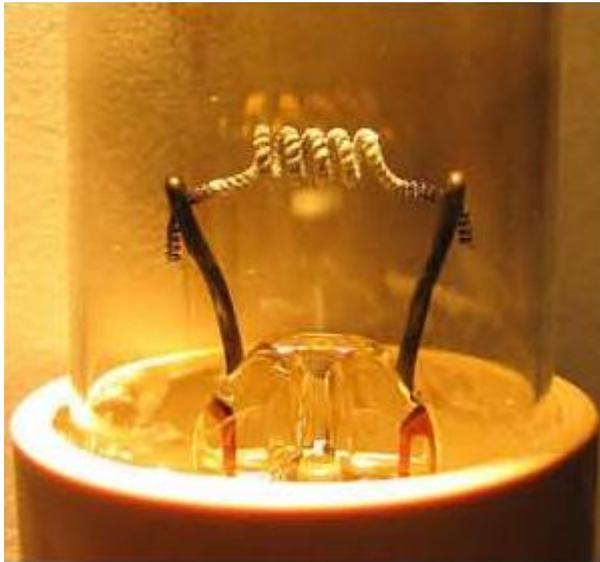


Figura 04: Terminal elétrico de uma lâmpada fluorescente. Fonte: Cosine, 2008.

A alimentação de corrente elétrica é controlada por um reator, instalado na luminária que suporta a lâmpada. Este reator rapidamente canaliza a corrente elétrica entre os dois terminais da lâmpada. Este fluxo de corrente é configurado e modo que ocorra uma diferença de carga entre os dois eletrodos, estabelecendo uma voltagem através do tubo (COSINE, 2008).

Esta é a primeira das tapas necessárias à geração de luz em uma lâmpada fluorescente: a descarga elétrica. Esta descarga ioniza os gases de enchimento, criando um fluxo de elétrons do cátodo para o ânodo. Um gás ionizado nada mais é que uma mistura de elétrons livres, íons positivos e espécies neutras, e é usualmente chamado de plasma (VAN DEN HOEK, 2004). Este plasma é um bom condutor de eletricidade, e daí ocorrem as descargas elétricas nas lâmpadas.

Este plasma (ou gás ionizado) é submetido a uma diferença de potencial elétrico entre os dois terminais da lâmpada. Esta diferença e potencial provoca uma aceleração dos elétrons livres presentes no plasma. Os elétrons energizados, então, colidem com os átomos de mercúrio, presentes nos gases de enchimento sob a forma de vapor. Após a colisão, os átomos de mercúrio ficam excitados.

Esta excitação do átomo de mercúrio nada mais é que uma mudança no movimento dos elétrons presentes neste átomo, em função do ganho de energia pela colisão. Este ganho de energia faz com que o elétron seja temporariamente impulsionado para uma órbita mais alta, ou seja, mais distante do núcleo. O elétron fica nesta posição por uma

pequena fração de segundo e, quase que imediatamente, é atraído pelo núcleo, para a sua órbita original. Quando ele retorna para a sua órbita original, o elétron libera a energia adicional que havia adquirido na forma de radiação eletromagnética (ASSUNÇÃO, 2009).

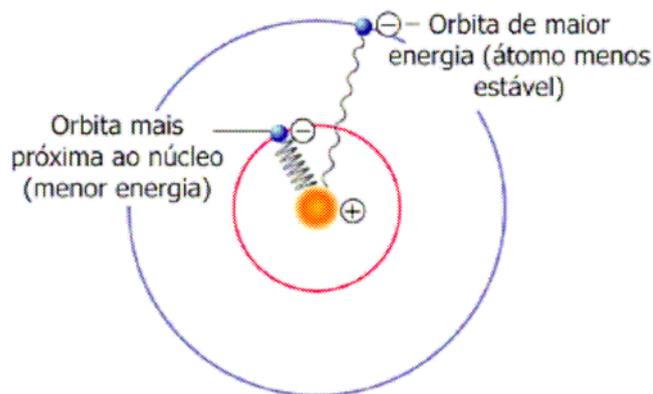


Figura 05: Emissão de luz por átomo excitado. Fonte: ASSUNÇÃO, 2009

O comprimento de onda da luz emitida depende da quantidade de energia liberada, que depende de uma posição particular do elétron. Conseqüentemente, diferentes tipos de átomos irão liberar diferentes tipos de luz. Em outras palavras, a cor de uma luz é determinada pelo tipo de átomo excitado. No caso das lâmpadas fluorescentes, como a luz é gerada pelo átomo de mercúrio, esta é liberada no comprimento de onda do ultravioleta (ASSUNÇÃO, 2009).

Neste momento, a lâmpada já gerou radiação luminosa. Porém, esta radiação se encontra na faixa ultravioleta do espectro e, com isso, não é visível a olho nu (COSINE, 2008). Para que a lâmpada gere luz no comprimento de onda visível, é necessário que mais um fenômeno ocorra: a luminescência.

A luminescência ocorre quando luz é produzida em função de excitação de átomos numa situação de excesso de radiação térmica. Quando este processo é induzido por radiações no espectro do ultravioleta, e a emissão de luz ocorre durante a excitação e até 10 a 8 segundos após a excitação, o fenômeno é chamado de Fluorescência – e daí, o nome das lâmpadas fluorescentes. (SRIVASTAVA, 1995, VAN DEN HOEK, 2004).

Substâncias sólidas que apresentam luminescência são chamadas de fósforos (VAN DEN HOEK, 1995). Quando os raios ultravioleta gerados pelos átomos de mercúrio



atingem a camada fosforosa que reveste a parede do tubo, ocorre a fluorescência e, com isto, a emissão de luz visível (JUNIOR, 2008).

O funcionamento descrito na seção anterior ilustra uma clássica lâmpada fluorescente tubular, e se aplica a todos os tipos de lâmpadas fluorescentes. Porém, existem modelos com variações de forma. É impraticável, por exemplo, criar uma lâmpada fluorescente simplesmente diminuindo o comprimento do tubo, uma vez que um tubo de menor comprimento provoca uma descarga elétrica ineficiente através do gás (VAN DEN HOEK, 2004). A alternativa é a criação de lâmpadas que “enrolam” o tubo em círculos, como a lâmpada fluorescente circular, e a lâmpada fluorescente compacta.

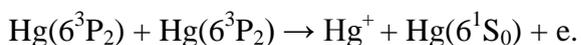
4. Comportamento do Mercúrio em uma lâmpada

Em 2003, RAPOSO (2003) e seus colaboradores realizaram um estudo para identificar a quantidade de mercúrio presente em lâmpadas fluorescentes usadas, bem como a forma química em que o mercúrio se encontra. Na fabricação da lâmpada é introduzido o mercúrio em sua forma metálica, Hg^0 .

Os estudos desenvolvidos por RAPOSO revelaram que tanto o Hg^0 , como as espécies Hg^{1+} e Hg^{2+} foram encontradas nos resíduos de pó de fósforo e lâmpadas. Houve casos em que apenas Hg^{2+} , na maior parte, foi encontrado. Isso demonstra que o mercúrio sofre transformações químicas no interior da lâmpada.

Isso ocorre porque a ionização dos gases no interior do tubo é dominada principalmente pelo mercúrio. Não ocorre praticamente nenhuma ionização dos gases nobres presentes no interior da lâmpada, conforme Bakker (2000) demonstrou em seu trabalho.

Então, como se comporta o mercúrio no interior de uma lâmpada? Inicialmente, com a lâmpada apagada, e no início de sua vida útil, encontra-se o mercúrio apenas na forma metálica, na fases líquidas e de vapor. Quando a lâmpada inicia a sua operação, as descargas elétricas tendem a ionizar o mercúrio, transformando-o em Hg^+ . Isso ocorre pela colisão entre dois átomos de mercúrio excitados, que pode levar à formação de um íon mercúrio e um elétron, como mostra Sheverev (2005).



Estes íons formados são lentamente absorvidos pelo vidro, pelo fósforo, e pelos eletrodos, perdendo a capacidade de influenciar na geração de luz no interior do tubo,



uma vez que, retidos nestas matrizes, não retorna ao estado de vapor metálico (COSINE, 2008). Inicialmente, este fenômeno não influencia o funcionamento da lâmpada, uma vez que o mercúrio é adicionado ao tubo em excesso. Porém, à medida que a lâmpada é utilizada e se aproxima do final de sua vida útil, mais e mais mercúrio passa para o estado ionizado e se prende às matrizes. De fato, com as pressões ambientais exigindo teores menores de mercúrio nas lâmpadas, maior a chance de a lâmpada deixar e funcionar em função de não possuir mercúrio metálico suficiente no estado de vapor. Quando isto ocorre, a luz gerada se torna mais rosada, uma vez que neste ponto o gás argônio se torna responsável pela formação de luz (COSINE, 2008).

Esse não é o único meio pelo qual a lâmpada deixa de funcionar. Isso pode ainda ocorrer devido à perda de material emissor nos filamentos de tungstênio, nas laterais das lâmpadas. Ao longo do uso, esse material é lentamente liberado em função da emissão de elétrons para o gás. Ele acumula sobre a pintura de fósforo nas extremidades da lâmpada, causando o escurecimento comumente visto em lâmpadas com longo tempo de uso (COSINE, 2008). Quando o filamento perde seu material emissor, perde a capacidade de transferir elétrons para o gás, e a lâmpada deixa de funcionar.

Um bom reator acoplado à lâmpada usualmente desliga a alimentação elétrica automaticamente quando o filamento perde o material emissor, e passa então a superaquecer. Porém, se o reator não desligar a corrente elétrica, o filamento também pode se romper (COSINE, 2008).

Assim, em função de quantas horas a lâmpada operou, e de qual foi o mecanismo que causou o fim de sua vida útil, podemos encontrar mercúrio na lâmpada em três formas: mercúrio metálico líquido (depositado nas paredes internas do tubo), mercúrio metálico gasoso e mercúrio iônico (aderido quimicamente aos componentes a lâmpada).

Os próprios fabricantes de lâmpadas admitem esta transformação química do mercúrio. Em um press-release divulgado pela empresa Sylvania, multinacional da área de iluminação, é afirmado que “o mercúrio contido em uma lâmpada fluorescente queimada está presente como mercúrio elementar, na forma líquida ou gasosa, e como mercúrio iônico solúvel” (OSRAM SYLVANIA, 2000).

Devido ao fato de os fatores que influenciam a vida útil de uma lâmpada serem vários, existe controvérsia quanto à quantidade das espécies de mercúrio nas lâmpadas. Dados fornecidos pela NEMA indicam que 0,2%, ou seja, 0,042 mg estão sob a forma de mercúrio elementar, no estado de vapor. Os outros 99,8% (20,958 mg) estão adsorvidos



sobre a camada fosforosa e o vidro, seja como mercúrio elementar, seja como mercúrio iônico (RAPOSO, 2003).

5. Riscos associados ao manuseio e transporte de lâmpadas

Todo o mercúrio existente em uma lâmpada está contido e selado em seu interior. Na fase de manuseio, em particular, o ponto fundamental é garantir a integridade da lâmpada, de modo que este mercúrio não migre para o ambiente.

A quantidade de mercúrio presente no interior de uma lâmpada é incerta, e como demonstrado anteriormente, a maior parte deste mercúrio não se encontra na forma gasosa. Do restante, parte ainda é mercúrio elementar volátil. A quantidade de mercúrio presente em uma única lâmpada fluorescente é de cerca de 20 mg, segundo RAPOSO (2000). Considerando que 0,2% deste mercúrio escape na forma de vapor no instante da quebra, ocorreria a emissão de cerca de 0,04 mg de mercúrio. Esta quantidade, em uma única exposição, não é suficiente para causar danos à saúde e ao ambiente.

Porém, considerando a volatilidade do mercúrio elementar, em função das condições de acondicionamento, a quantidade de mercúrio restante nas lâmpadas tende a migrar para a fase gasosa. AUCOTT et al (2003), em estudo sobre a emissão de mercúrio a partir de lâmpadas quebradas, concluiu que numa faixa de temperatura entre 5 a 30 °C, entre 17 e 40% do mercúrio contido em uma lâmpada irá volatilizar em um período de 2 semanas, sendo que as maiores taxas de volatilização correspondem às temperaturas mais elevadas. Em temperaturas mais elevadas, o estudo concluiu que um terço da quantidade total de mercúrio contida na lâmpada pode ser liberada nas primeiras 8 horas após a quebra.

De fato, ZAVARIZ (2007) recomenda que, para lâmpadas que se quebrem acidentalmente durante o manuseio, o acondicionamento deve ser realizado separadamente das demais lâmpadas, em recipientes hermeticamente fechados resistentes à pressão, revestido internamente com saco plástico especial para evitar sua contaminação, e com a informação de que se trata de lâmpada quebrada com mercúrio.

Outro ponto a se considerar é o material fluorescente. Este material se apresenta na lâmpada como um pó muito fino, aderido à parede interna do vidro. JANG et al (2005), determinou que entre 2,72% e 5,34% do mercúrio contido em uma lâmpada é liberado juntamente com poeira emitida no momento da quebra. Ainda que continue adsorvido ao



pó, este material muito fino pode ser inalado por pessoas que estiverem muito próximas ao local de ruptura da lâmpada. Fixando-se no trato respiratório, este pó liberará mercúrio ao longo do tempo, sob forma de vapor, que será absorvido pelo organismo.

Novamente, a exposição à poeira emitida na ruptura de uma única lâmpada não é suficiente para causar maiores danos à saúde. Porém, trabalhadores sujeitos à contínua exposição, como os responsáveis pela substituição de lâmpadas queimadas, deveria utilizar máscaras contra poeira, de modo a minimizar os riscos de exposição.

Para as lâmpadas que serão acondicionadas inteiras, ZAVARIZ (2007) recomenda que sejam embaladas individualmente, colocando-as preferencialmente em suas embalagens originais, mantendo-as intactas e protegidas contra eventuais choques que possam provocar a sua ruptura, e armazená-las em local seco. Caso não seja possível reaproveitar as embalagens originais, recomenda-se ser utilizado papelão, papel ou jornal e fitas colantes resistentes para envolver as lâmpadas, protegendo-as contra choques. Estas lâmpadas embaladas individualmente devem, então, ser acondicionadas em recipiente portátil ou caixa resistente apropriados para o transporte, de forma a evitar a quebra das mesmas.

Empresas de descontaminação de lâmpadas, no Brasil e no mundo, fornecem caixas de papelão especiais desenvolvidas para o transporte das lâmpadas. GLENZ et al (2009), realizou um estudo sobre a capacidade de estas embalagens conterem o mercúrio, em caso de quebra durante o transporte. No estudo, embalagens contendo lâmpadas foram submetidas a choque, e a concentração de mercúrio no ar resultante foi monitorada.

No caso de caixas de papelão contendo lâmpadas sem embalagem intermediária (como um filme de papel entre as camadas de lâmpadas), chegaram-se a concentrações da ordem de 1 mg/m^3 , valor 25 vezes maior que o limite da NR 15 para não uso de EPI's, e acima da concentração para interdição da atividade ($0,12 \text{ mg/m}^3$, segundo a NR-15).

No caso de caixas de papelão contendo filme intermediário entre as camadas de lâmpadas, a concentração medida variou entre $0,0035 \text{ mg/m}^3$ e $0,1023 \text{ mg/m}^3$, dependendo do modelo da embalagem. Nota-se, portanto, a importância de um estudo mais aprofundado com relação ao modelo a ser adotado no acondicionamento das lâmpadas. O autor ressalta ainda a necessidade de se estudar a migração de mercúrio para as embalagens em si, no caso de ruptura durante o transporte.



Para minimizar o risco de ruptura de lâmpadas durante o transporte, algumas empresas especializadas preferem realizar uma moagem simples das lâmpadas, no ponto de geração, de modo a transportar as lâmpadas moídas em recipientes herméticos.

O processo de moagem simples visa realizar a quebra das lâmpadas, utilizando-se um sistema de exaustão para a captação do mercúrio presente na forma de vapor nas lâmpadas. Deste modo, o teor mercúrio ainda presente no produto da moagem é inferior ao anteriormente encontrado nas lâmpadas quando inteiras, com a vantagem de inexistir riscos de ruptura das lâmpadas e emissão de vapores durante o transporte. (ZANICHELI et al, 2004)

O mais popular sistema de moagem simples foi desenvolvido pela Air Cycle Corp., dos Estados Unidos, e é conhecido mundialmente como “Bulb Eater” (comedor de lâmpadas, figura 06). O equipamento consiste em um moinho de lâmpadas montado sobre um tambor metálico, com sistema de exaustão para captura de vapores de mercúrio. Os gases exauridos pela unidade passam por um filtro de tecido, e um filtro de carvão ativado (no qual é agregado 15% em peso de enxofre amarelo), antes da emissão para a atmosfera. O enxofre combina-se com o mercúrio, formando sulfeto de mercúrio, composto insolúvel e não volátil. O sistema trabalha com uma vazão de exaustão de 68 m³/h. (ZANICHELI et al, 2004).

Em 2001, o órgão ambiental americano (USEPA) realizou um aprofundado estudo sobre equipamentos de moagem e tratamento e lâmpadas. No caso do Bulb Eater, os estudos indicaram que a concentração de mercúrio nos gases no interior do moinho, antes do tratamento nos filtros, é de 4 mg/m³, e após o tratamento dos gases esta concentração cai para 0,045 mg/m³ – uma eficiência no controle dos gases de 98,9%. Porém, isto ainda representa uma taxa de emissão de 3,06 mg de mercúrio por hora. (USEPA, 2001).

Cabe considerar ainda a exposição ocupacional. No Brasil, a exposição de um trabalhador ao mercúrio é definida pela norma NR-15, do Ministério do Trabalho e Emprego. Segundo esta norma, a concentração máxima de mercúrio no ambiente de trabalho é de 0,04 mg/m³. Desta forma, se o operador do Bulb Eater estiver próximo à saída de gases do sistema de filtragem, deverá obrigatoriamente utilizar equipamentos de proteção respiratória. Como a atividade é realizada nas instalações do gerador das lâmpadas, é importante garantir que pessoas estranhas à operação do equipamento mantenham-se afastadas durante a operação.



Figura 06 - Sistema Bulb Eater de Moagem de Lâmpadas. Fonte: ZANICHELI et al, 2004

O Bulb Eater é um equipamento pequeno, de fácil operação e mobilidade e proporcionalmente mais barato que outras tecnologias. (ZANICHELI et al, 2004). Porém, deve ser considerado apenas como uma opção de redução de riscos no transporte das lâmpadas, uma vez que, por si só, não efetua a descontaminação das lâmpadas. A literatura mundial indica que o mercúrio nas lâmpadas, quando estas estão apagadas, encontra-se primordialmente depositado sobre as paredes internas do vidro, sob forma elementar ou iônica. Deste modo, a moagem simples não faz a remoção de todo o mercúrio da lâmpada, apenas evita que o mercúrio que se encontra na forma gasosa escape para o meio ambiente.

Outro fator a se considerar são os custos dos processos de tratamento. Segundo a USEPA (2001), o preço cobrado para a descontaminação das lâmpadas, pelas unidades recicladoras, é tipicamente maior no caso de recebimento de lâmpadas já moídas, se comparado com o valor cobrado para a descontaminação de quantidade equivalente de lâmpadas inteiras. Isso é lógico, uma vez que o Bulb Eater e equipamentos similares misturam no tambor vidro, metais e pó fluorescente, todos contaminados com mercúrio, que necessitam ser devidamente separados para que possam ser reaproveitados.

6. Riscos associados ao tratamento das lâmpadas

A Política Nacional de Resíduos determina que, a partir de 2014, apenas rejeitos sejam encaminhados a aterros. As lâmpadas contendo mercúrio, por serem passíveis de



tratamento para remoção do mercúrio e reaproveitamento de seus componentes, não podem ser considerados resíduos. Segundo ZANICHELII (2004) processos para tratamento das lâmpadas são conhecidos desde a década de 70, quando a MRT Technologies surgiu na Suécia, tornando-se a primeira empresa no mundo a realizar o tratamento das lâmpadas.

ZANICHELII (2004) e MOMBACH (2008), classificam as alternativas existentes para a destinação final e/ou tratamento das lâmpadas da seguinte forma:

- Disposição em aterros (com ou sem um pré-tratamento);
- Moagem simples (com ou sem separação dos componentes);
- Moagem com tratamento térmico;
- Moagem com tratamento químico;
- Tratamento por sopro;
- Solidificação/Encapsulamento (cimento e ligantes orgânicos).

Considerando, porém, o determinado na PNRS, a disposição em aterros não pode ser considerada uma opção dentro do ciclo de vida reverso da lâmpada. A moagem simples, como demonstrado, é uma alternativa para transporte, e não uma técnica de tratamento. Assim, as opções a serem consideradas para o tratamento das lâmpadas são:

- Moagem com tratamento térmico;
- Moagem com tratamento químico;
- Tratamento por sopro;
- Solidificação/Encapsulamento (cimento e ligantes orgânicos).

Segundo ZANICHELII (2004), o processo de **moagem com tratamento térmico** é o mais usual e em operação em várias partes do mundo, e envolve basicamente duas fases: fase de esmagamento e fase de destilação do mercúrio – daí o nome tratamento térmico.

Na fase de esmagamento as lâmpadas usadas são introduzidas em processadores especiais para esmagamento, quando então os materiais constituintes são separados em 5 classes:

- terminais de alumínio;
- pinos de latão/ componentes ferro-metálicos;
- vidro;
- poeira fosforosa rica em mercúrio e
- isolamento baquelítico.

O rompimento das lâmpadas ocorre por meio de um processador (britador e/ou moinho) (ZANICHELLI, 2004). Algumas empresas utilizam para tanto um Bulb Eater (SILVA, 2007). No momento do esmagamento, as partes metálicas podem ser separadas, e a poeira fosforosa pode ser separada posteriormente por processos mecânicos ou pneumáticos (SILVA, 2007).

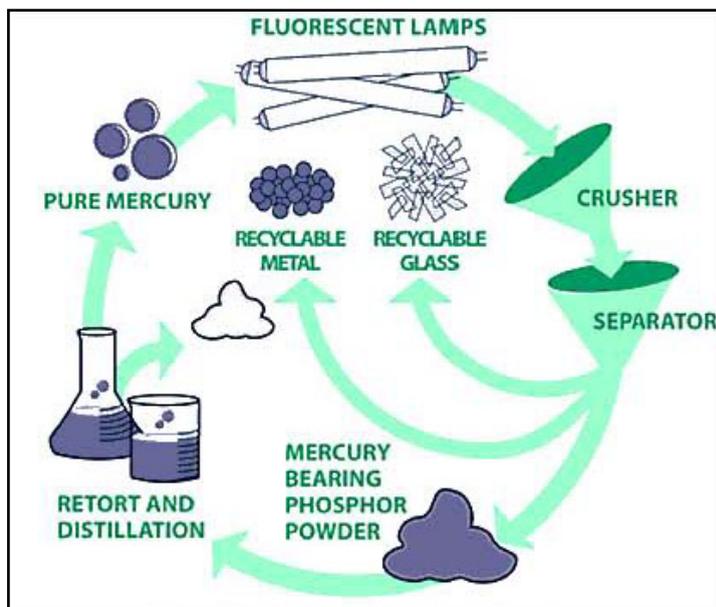


Figura 07 - Tratamento Térmico de Lâmpadas. Fonte: RAPOSO, 2001.



O vidro obtido neste processo possui um teor de mercúrio de até 1,3 mg/kg. (ZANICHEL, 2004). A concentração média de mercúrio nas partes metálicas separadas não excede 20 mg/kg (SILVA, 2007).

A poeira de fósforo é normalmente enviada a uma unidade de destilação (retorta), onde o material é aquecido até a vaporização do mercúrio (temperaturas acima do ponto de ebulição do mercúrio - 357o C). O material vaporizado a partir deste processo é condensado e coletado em coletores especiais ou decantadores. (ZANICHEL, 2004).

O principal impacto ambiental está associado ao fato de o processo ser realizado à seco. Em todas as etapas, cuidados especiais com sistemas de ventilação forçada e vácuo devem ser tomados para não haver emissões fugitivas de mercúrio. (SILVA, 2007).

Ainda assim, o processo térmico, desde que devidamente controlado, é a melhor alternativa existente no momento (USEPA, 2001). Promove a recuperação do mercúrio, a reciclagem dos constituintes das lâmpadas e não gera resíduos perigosos que seriam destinados a aterros. Tal geração de resíduos ocorre nas demais alternativas.

O processo de **tratamento por sopro** é bastante similar ao processo de tratamento de moagem e tratamento térmico. Neste processo, as duas extremidades contendo os soquetes de alumínio são quebradas, através de um sistema de aquecimento e resfriamento. Em seguida, o tubo de vidro já sem os soquetes recebe um jato de ar comprimido em seu interior, arrastando-se assim o pó de fósforo contendo mercúrio de seu interior. O pó removido pelo sopro passa por um sistema de ciclones, e a corrente de ar passa em seguida por um sistema de filtros de carvão ativado. (ZANICHEL, 2004).

O pó coletado pode então ser encaminhado à processos de destilação do mercúrio, similares aos utilizados no processo por moagem.

O **processo químico**, assim como o térmico, pode ser dividido em duas etapas – fase de esmagamento e fase de contenção do mercúrio. A grande diferença entre os métodos é que, no processo químico, a fase de esmagamento é realizada com lavagem do vidro. Assim, a ruptura das lâmpadas ocorre sob uma camada de água, evitando que o vapor de mercúrio escape para a atmosfera. A mistura de vidro e partes metálicas é então lavada, separando-se vidro e metais para reciclagem. (ZANICHEL, 2004).

O líquido de lavagem contendo o mercúrio e o pó de fósforo é então filtrado ou precipitado, separando-se ou não o pó de fósforo. O líquido já filtrado/separado passa então por um tratamento químico com Na_2S , Na_2SO_3 ou NaHSO_3 ; o mercúrio é



transformado em HgS (precipitado), um composto sólido insolúvel em água. Após o tratamento, uma nova filtragem separa o mercúrio precipitado como HgS da água. A água pode ser reutilizada no processo. (ZANICHELI, 2004)

Tanto o pó de fósforo quanto o mercúrio precipitado podem ser tratados por destilação, recuperando-se o mercúrio metálico que é encaminhado para reciclagem. Algumas empresas, porém, encaminham ambos os materiais para aterros.

Cuidado adicional deve ser adotado no uso de sulfetos para a precipitação do mercúrio. O sulfeto de sódio, de fato, reage com o mercúrio iônico, formando o sulfeto de mercúrio insolúvel. Porém, excesso de sulfeto pode levar à formação de dissulfomercurato ($[\text{HgS}_2]^{2-}$), inviabilizando então o processo de separação do mercúrio da água. (VOGEL, 1981).

Os riscos ocupacionais e ambientais associados à liberações de mercúrio, porém, são menores que aqueles associados ao processo seco. Por outro lado, a destilação do mercúrio de materiais filtrados por esse método acaba sendo mais cara, em função da quantidade de água presente no processo. Por este motivo, o processo a seco acaba sendo mais utilizado (SILVA, 2007).

O **processo de solidificação** possui etapas similares aos processos de tratamento químico e tratamento térmico. Há uma fase de esmagamento, no qual a lâmpada pode ser quebrada por via seca ou úmida. Os materiais resultantes, porém, são encapsulados em concreto e/ou ligantes orgânicos, podendo ou não ser estabilizados quimicamente previamente (formação de sulfeto de mercúrio), e então destinados a aterros. (SILVA, 2007).

7. Riscos associados à reutilização de componentes

Usualmente, as partes de vidro e metais das lâmpadas fluorescentes são encaminhadas para reciclagem. Estes materiais, porém contém ainda certa quantidade de mercúrio, que chegam a 1,3 mg/kg, no caso dos vidros, e 20 mg/kg, no caso dos metais (SILVA, 2007).

Os processos de reciclagem de ambos os materiais podem envolver o aquecimento destes, levando a um risco potencial de liberações de mercúrio para o ambiente.

Uma grande recicladora de lâmpadas do Brasil, por exemplo, gera 432 toneladas anuais de vidro de lâmpadas desmercurizado. Esse vidro é encaminhado para reciclagem



na indústria cerâmica, onde passa por processos térmicos. (SILVA, 2006). Estes processos podem volatilizar o mercúrio, que acaba emitido para a atmosfera, uma vez que as indústrias usualmente não possuem equipamentos para controle de emissões de mercúrio.

Considerando que este vidro possui um teor médio de 1 mg/kg de vidro, as 432 toneladas anuais de vidro pode indicar uma emissão atmosférica anual de 432 gramas de mercúrio.

A mesma empresa gera um total de 2,2 toneladas por ano de partes metálicas de lâmpadas, encaminhado à processos de fundição. Considerando que estes metais possuem um teor médio de 20 mg/kg de vidro, pode ocorrer uma emissão atmosférica anual de 440 gramas de mercúrio.

Somados estes dois componentes, vidro e metais, oriundos de uma única recicladora, chega-se a uma emissão de quase 1 kg anual de mercúrio. Considere-se, porém que esta empresa, ainda que líder de mercado, recebe apenas uma fração da quantidade total de lâmpadas descartadas anualmente no Brasil. Com a implementação de uma eficaz rede de logística reversa, o montante de mercúrio emitido para a atmosfera a partir de materiais reciclados de lâmpadas será muito maior. É necessário, então, uma discussão mais aprofundada quanto à autorização de processos industriais que recebam materiais oriundos de lâmpadas para uso em suas atividades fabris.

Conclusões

A Política Nacional de Resíduos instituiu a obrigatoriedade de implementação de logística reversa para as lâmpadas fluorescentes, considerando o fato destas serem um resíduo perigoso. Os órgãos setoriais pertinentes estão se estruturando para a implementação dos pontos de coleta necessários para que os usuários destinem adequadamente suas lâmpadas.

Porém, em função das características das lâmpadas (construídas em material de vidro, frágeis), e do metal existente em seu interior, um cuidado maior deve ser adotado em todos os elos deste ciclo reverso. As lâmpadas podem, em maior e menor grau, causar impactos ambientais na geração, no acondicionamento, no transporte, no tratamento e na reciclagem dos componentes.



Há um esforço global no sentido de se minimizar ao máximo as emissões antrópicas do mercúrio, e este esforço deve incluir a cadeia reversa das lâmpadas.

A logística reversa, mais que ser um mero caminho indicado entre o gerador do resíduo e a destinação, deve considerar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida reverso dos produtos, em todas as etapas. A responsabilidade compartilhada se aplica não só na geração do resíduo, mas também em sua logística reversa. Desta forma, estudos e esforços adicionais devem existir no sentido de melhor equacionar a questão das lâmpadas fluorescentes no Brasil.

Referências

ANDRÉ A.S. Sistemas eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Departamento de engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

APLIQUIM Brasil Recicle. Descarte De Lâmpadas E Política Nacional De Resíduos Sólidos: O Que Você Precisa Saber. Disponível em <http://www.apliquimbrasilrecicle.com.br/saibamais>. Acesso em 29/03/13.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 - Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSUNÇÃO, Milene Stanghelin. Quimiluminescência Bioluminescência. Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para conclusão da graduação de Licenciatura Plena em Química na Universidade de Itaúna. Itaúna, 2009.

AUCOTT, Michael. MCLINDEN, Michael. WINKA, Michael. Release of Mercury from Broken Fluorescent Bulbs. Journal of the Air & Waste Management Association, Volume 53, Fevereiro, 2003.

BAIRD, Colin. Environmental Chemistry. Segunda Edição, Freeman, W. H. & Company, 2002.



BAKKER, Levinus Pieter. Plasma control of the emission spectrum of mercury-noble-gas discharges. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2000. –Proefschrift.

COSINE DEVELOPMENTS. Analysing the Causes of Blackening of Ends of Fluorescent Lamps. 2008. Disponível em <http://www.cosine.co.za/Black%20End%20Rings%20on%20Fluorescent%20lamps.pdf>.

Acesso em 23/01/2013.

FADINI, Pedro Sérgio. Comportamento biogeoquímico do mercúrio na bacia do Rio Negro (AM). 1999. 106 p. Tese de Doutorado - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

GLENZ, Tracy T. BROSSEAU, Lisa M. HOFFBECK, Richard W. Preventing Mercury Vapor Release from Broken Fluorescent Lamps during Shipping. Journal of the Air & Waste Management Association, Volume 59, Março, 2009.

IDECA – Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor.. Revista IDECA nº166 - Junho 2012

JANG, Min. SEUNG, Mo Hong. PARK, Jae K. Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps. Waste Management 25 (2005) 5–14.

JÚNIOR, Walter Alves Durão. WINDMÖLLER, Cláudia Carvalhinho. A Questão do Mercúrio em Lâmpadas Fluorescentes. Química Nova na Escola, nº 28, MAIO 2008.

LANE, Kris. Dangerous Attractions - Mercury in Human History. In: ZUBER, Sharon L (ed.). NEWMAN, Michael C. (ed.). Mercury Pollution - A Transdisciplinary Treatment. Boca Raton, CRC Press, 2012.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Mercúrio. Disponível em <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/mercurio>. Acesso em 29/03/13.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Perfil do Gerenciamento de Mercúrio no Brasil, incluindo seus Resíduos. Brasília, 2011

MOMBACH, V L, et al. O estado da arte na reciclagem de lâmpadas fluorescentes no brasil: parte 1. Revista Acta Ambiental Catarinense v. 5. n.1/2, jan./dez./2008



MUÑOZ, Susana Inês Segura. Impacto Ambiental na área do Aterro Sanitário e Incinerador de Resíduos Sólidos de Ribeirão Preto. 2002. 131p. Tese de Doutorado. - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, Jéssica Cavalcante de. GABRIELE, Camila Sabóia Moraes. FIRMINO, Sara Fátima Gomes Firmino. CUNHA, André Leite Cunha. MÁXIMO, Helison de Oliveira Máximo. SANTOS, Gemelle Oliveira. Estudo preliminar do destino final de lâmpadas fluorescentes pós-consumo em Fortaleza, Ceará. VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, 2012. Disponível em <http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/2380/2277>. Acesso em 29/03/13.

OSRAM-SYLVANIA. The Truth about TCLP-Passing Fluorescent Lamps. Disponível em http://leirecycle.com/wp-content/uploads/2011/08/The_Truth_About_TCLP_Passing_Lamps.pdf. Acesso em 23/01/2013.

RAPOSO C.; WINDMÖLLER C.C. e DURÃO Jr., W.A. Mercury speciation in fluorescent lamps by thermal release analysis. Waste Management, v. 23, p. 879-886, 2003.

RAPOSO, C. Contaminação ambiental provocada pelo descarte não controlado de lâmpadas de mercúrio no Brasil. 2001. Tese (Doutorado em Geologia)- Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SHEVEREV, Valery A. LISTER, Graeme G. STEPANIUK, Vadim. Ionization processes in fluorescent lamps: Evaluation of the Hg chemi-ionization rate coefficients. Physical Review E 71, 056404 s2005d.

SILVA, Fernando R.. Estudo de Contaminação de Solo e Águas Subterrâneas – Monitoramento Superficial. Apliquim, Paulínia, 2003.

SILVA, Fernando R.. Composição Quali-Quantitativa e Destinação de Produtos e Resíduos. Apliquim, Paulínia, 2006.



SILVA, Fernando R.. Estudo de Tecnologias de Descontaminação de Componentes de Lâmpadas. Apliquim, Paulínia, 2007.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Survey and Initial Evaluation of Small On-Site Fluorescent Lamp Crushers. USA, 2001.

SRIVASTAVA, Alok M. Soules, Thomas F. Phosphors. In Kroshwitz, J.I. Howe-Grant, M. (eds). The Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Quarta Edição, Wiley Interscience, New York, 1995.

VAN DEN HOEK, Willem J. JACK, Alexander G. LUIJKS, Gerardus M. J. F. Lamps. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Sétima Edição, Wiley Interscience, New York, 2004.

VOGEL, Arthur. Química Analítica Qualitativa. São Paulo, Mestre Jou, 1981.

WEISS, B. Long ago and far away: retrospective and implications of Minamata. Neurotoxicology, v. 17, n. 1, p.257-264, 1996.

ZANICHELI, Claudia et al.. Reciclagem de lâmpadas

Aspectos Ambientais e Tecnológicos. Campinas, PUCC, 2004.

ZAVARIZ, Cecília. Documento de Recomendações a Serem Implementadas pelos Órgãos Competentes em todo o Território Nacional Relativas as Lâmpadas de Mercúrio. São Paulo, 2007.