

**Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR**

Publicação CDTN-911

**Contaminação ambiental provocada
pelo descarte não-controlado de
lâmpadas de mercúrio no Brasil**

Cláudio Raposo

2001

**Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR**

Publicação CDTN-911

**CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL PROVOCADA PELO DESCARTE
NÃO-CONTROLADO DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO NO BRASIL**

Cláudio Raposo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto,
como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia
Área: Geologia ambiental e conservação de recursos naturais
Orientador: Prof^o. Dr. Hubert Mathias Roeser
Co-orientador: Prof^o. Dr. Cornélio Carvalho de Freitas

Belo Horizonte

2001

Este trabalho foi realizado no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, da Comissão Nacional de Energia Nuclear , na Supervisão de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL PROVOCADA PELO DESCARTE
NÃO-CONTROLADO DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO NO BRASIL**

por

CLÁUDIO RAPOSO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS NATURAIS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA AMBIENTAL E CONSERVAÇÃO DE
RECURSOS NATURAIS**

ORIENTADOR: PROF. DR. HUBERT MATHIAS ROESER

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. CORNÉLIO CARVALHO DE FREITAS

**OURO PRETO
AGOSTO/2001**

CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL PROVOCADA PELO DESCARTE NÃO-CONTROLADO DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO NO BRASIL

por

CLÁUDIO RAPOSO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e
Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título
de Doutor em Geologia
Área de Concentração: Geologia Ambiental e Conservação de recursos Naturais

Ouro Preto
Agosto/2001

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hubert Mathias Roeser
Departamento de Geologia/UFOP – Orientador

Prof. Dr. Maurício Xavier Coutrim
Departamento de Química/ICEB/UFOP

Prof. Dr. Frank Stapelfeldt
Departamento de Engenharia de Minas/UFOP

Prof^a. Dra. Cláudia Carvalhinho Windmöller
Departamento de Química/ICEX/UFMG

Dra. Vanusa Maria Feliciano Jacomino
CDTN/CNEN

“TODO ERRO EM QUE SE INCORRE TERÁ, INEVITAVELMENTE, SUA REPERCUSSÃO QUE SEMPRE SE TERÁ DE ESPERAR PORQUE, CEDO OU TARDE, A LEI EXIGIRÁ UMA REPARAÇÃO. CORRIGIR O ERRO É, POIS, EVITAR SUA CONSEQÜÊNCIA. CONTROLAR OS MOVIMENTOS, TRATANDO DE PRODUZIR ACERTOS E NÃO ERROS, É SEMEAR O BEM FUTURO, BEM QUE SERÁ TANTO PARA SI COMO PARA O SEMELHANTE”

(Sabedoria Logosófica)

Aos meus pais Hélio Raposo (*in memoriam*) e Yolanda.

À minha esposa Simone.

Aos meus filhos Karina, Cláudio, Adriano e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Hubert Mathias Roeser pelo apoio, amizade e confiança em mim depositados, que extrapolam a relação professor/aluno.

Ao professor Dr. Cornélio de Freitas Carvalho, pelas valiosas contribuições aos trabalhos de revisão e classificação de resíduos.

À professora Dra. Cláudia Carvalhinho Windmöller, pelos trabalhos desenvolvidos com termodessorção de mercúrio, no Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas (ICEX) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Ao professor Paulo Március Silva Campos, do curso de Comércio Exterior do Unicentro Newton Paiva e Consultor da Fiemg.

Ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, professores e funcionários.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), pela oportunidade que me foi concedida e pelo apoio logístico, laboratorial e financeiro, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

À Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (Fiemg), à Federação do Comércio do Estado de Minas Gerais (FCEMG), à Associação dos Hospitais de Minas Gerais (Ahmg) e à Associação Mineira de Municípios (AMM) pelo apoio à pesquisa de *survey* efetuada no âmbito do Estado de Minas Gerais, junto aos setores industrial, comercial, hospitalar e prefeituras municipais, respectivamente.

Aos colegas de trabalho Walter de Brito (análises por difração de Raios X), Maria Ângela B. C. Menezes (análises por ativação com nêutrons), Helena Eugênia L. Palmieri e Lilian Viana Leonel (análises por espectrometria de absorção atômica - CVAAS), Robson Cota de Oliveira (espectrometria de emissão atômica - ICP/AES), Francisco Jorge Caldeira (análises granulométricas) e Lenira Lúcia S. P. Pereira (Biblioteca).

TRABALHOS GERADOS PELA TESE

1. Visão geral sobre o descarte e reciclagem de lâmpadas fluorescentes.

Publicação CDTN 844/99, agosto/1999, 38 p.

Raposo C.

2. Contaminação ambiental causada pelo descarte de lâmpadas de mercúrio.

Revista Escola de Minas de Ouro Preto - REM, Ano 64 - v. 53 - n. 1, jan/mar/2000.

Raposo C., Roeser H.M.

3. Contamination of the environment by the current disposal methods of mercury-containing lamps in the State of Minas Gerais, Brazil.

Waste Management Journal/Elsevier Science Ltd., agosto 2001, vol. 21/7, 661-670.

Raposo C., Roeser H.M.

4. Caracterização química dos principais constituintes de lâmpadas de mercúrio com vistas ao controle ambiental.

Artigo apresentado ao V Enan, outubro/2000, Rio de Janeiro, p. 145 (Livro de Resumos).

Raposo C. et. al.

5. Recycling processes for mercury lamps - The state of the art.

Artigo submetido à Revista Química Nova, Código 135/00 (no prelo).

Raposo C., Carvalho C.F.

6. Classificação dos resíduos gerados por lâmpadas de mercúrio, quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

Artigo submetido à Revista Química Nova, Código 195/00.

Raposo C.

7. Necessidade de legislação federal específica para o gerenciamento de resíduos de lâmpadas de mercúrio.

Resumo apresentado ao 1º Congresso Brasileiro de Meio Ambiente, Fortaleza (CE), dezembro de 2000. p. 202.

Raposo C.

**8. Legislação ambiental sobre o descarte de lâmpadas de mercúrio –
Proposta de Resolução ao Conama.**

Proposta encaminhada aos Conselheiros do Conama, representantes do Estado de Minas Gerais, por intermédio do deputado Sávio Souza Cruz (autor do Projeto de Lei 4/99).

Raposo C.

9. Mercury speciation in fluorescent lamps by thermal release analysis.

Artigo submetido à Revista Environmental Science & Technology.

Raposo C., Windmöller C.C., Durão Júnior W.A.

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abilux	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
Abradee	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AERC	Advanced Environmental Recycling Company
AGLV	Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung
AHMG	Associação dos Hospitais de Minas Gerais
Alba	Assembléia Legislativa do Estado da Bahia
ALMG	Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais
ALRS	Assembléia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul
AMM	Associação Mineira de Municípios
Anfavea	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
APHA	American Public Health Association
BDAT	Best Demonstrated Available Technology
CFR	Code Federal Regulation
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
Cetesb	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e Limpeza Pública
CIF	Cost, Insurance, Freight (Custo, seguro e frete)
CIPO	Canadian Intellectual Property Office
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
Cofins	Contribuição para Seguridade Social
Conama	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPMF	Contribuição Provisória sobre Movimentação Financeira
CV-AAS	Espectrometria de Absorção Atômica por Vapor Frio
Degeo/Ufop	Departamento de Geologia/Universidade Federal de Ouro Preto

Dytec	Dinamics Technologies for the Environmental Industry
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental
EM	Escola de Minas de Ouro Preto
Enan	Encontro Nacional de Aplicações Nucleares
EPO	European Patent Office
EUA	Estados Unidos da América
FCEMG	Federação do Comércio do Estado de Minas Gerais
Fiat	Fiat Automóveis S. A.
Fiemg	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FOB	Free on board
GE	General Electric
HID	High Intensity Discharge
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Iceb	Instituto de Ciências Exatas e Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto
Icex	Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ICP/AES	Plasma Acoplado Indutivamente/Espectrometria de Emissão Atômica
II	Imposto de Importação
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPC	Índice Potencial de Consumo
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRC	Índice de Reprodução de Cores
ISO	International Organization of Standardization
ISSQN	Imposto sobre Serviços de Qualquer Natureza
LF	Lâmpada fluorescente
LV	Lâmpada a vapor
Limnos	Limnos Hidrobiologia e Limnologia Ltda.
MMA	Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal
MRT	Mercury Recovery Technology
MTb	Ministério do Trabalho e Emprego

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Nema	National Electrical Manufactures Association
NR	Norma Regulamentadora
OMS	Organização Mundial de Saúde
Osha	Occupational Safety and Health Administration
PIS	Programa de Integração Social
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act
REM	Revista da Escola de Minas de Ouro Preto
Sisnama	Sistema Nacional de Meio Ambiente
TC	Toxicity Characteristic
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
TDAAS	Termo-desorption/Atomic Absorption Spectrometry
TL	Teste de Lixiviação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
Ufop	Universidade Federal de Ouro Preto
Unido	United Nations Industrialized Development Organization (Organização para o Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas)
USA	United States of America
Usepa	United States Environmental Protection Agency
USDS	Dólar norte-americano
USPTO	U. S. Patent & Trademark Office
WHO	World Health Organization (Organização Mundial de Saúde)

RESUMO

Esta tese examina a questão da contaminação ambiental provocada pelo descarte não-controlado de lâmpadas de mercúrio no Brasil. Compreende uma pesquisa de *survey* junto às principais empresas públicas e privadas do Estado de Minas Gerais, com projeções para outras regiões e setores da economia brasileira, análises químicas de resíduos de lâmpadas para caracterização e classificação de acordo com norma brasileira de resíduos sólidos, levantamento de patentes, contatos com empresas recicladoras e fabricantes de equipamentos, estudo de especiação de mercúrio e avaliação econômico-financeira para instalação de uma usina de reciclagem de lâmpadas, com base no processo térmico.

A prática corrente de descarte de lâmpadas que predomina amplamente é a modalidade feita diretamente no lixo. Os setores público e industrial são os maiores geradores de descarte de lâmpadas tipo HID – *high intensity discharge* (vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores metálicos) e lâmpadas fluorescentes, respectivamente. Constatou-se que as empresas privadas e órgãos públicos, de um modo geral, desconhecem os efeitos adversos causados pelo mercúrio e, em decorrência da ausência de uma legislação específica, não sabem como gerenciar os resíduos desse metal. Em 1998, 48,5 milhões de unidades de lâmpadas de mercúrio foram descartadas, com uma carga poluidora de 1.000 kg de Hg (média de 20,6 mg/lâmpada). Já no ano de 2000, esse descarte passou a 80 milhões de unidades e espera-se, para o ano de 2001, um aumento substancial, em virtude do plano de racionamento de energia elétrica que motivou a troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas mais eficientes, principalmente no setor residencial. O foco da contaminação está localizado na Região Sudeste, que concentra 60% da economia brasileira. Do descarte total, somente 3% têm destinação ambientalmente adequada por meio do processo de reciclagem. Isso é feito voluntariamente por empresas que possuem um sistema controlado de descarte de seus resíduos e/ou por aquelas interessadas em certificação pelas normas da série ISO 14.000.

Os resultados analíticos comprovaram que os resíduos de lâmpadas de mercúrio são duplamente perigosos (Classe I): primeiro, pelo mercúrio contido em lâmpadas fluorescentes e lâmpadas a vapor de mercúrio; e segundo, pelo chumbo existente no vidro do bulbo externo e soldas de lâmpadas a vapor de mercúrio. Esses resíduos requerem tratamento específico e não podem ser lançados livremente ao meio ambiente. A situação existente é grave e preocupante, pois o limite regulatório brasileiro para o mercúrio ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$) é muito

conservador e corresponde, por exemplo à metade do norte-americano ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$), o que deixa dúvidas sobre o controle das lâmpadas importadas provenientes daquele país, bem como as oriundas de outros, principalmente do sudeste asiático.

Dentre as técnicas de tratamento de resíduos de lâmpadas, o destaque vai para a reciclagem, via tratamento químico ou térmico. Essa atividade, além de ser ambientalmente correta, possibilita, adicionalmente, a obtenção e reutilização de subprodutos. Entretanto, no caso específico da reciclagem térmica, o custo operacional é ainda elevado em decorrência da estrita dependência de importação de equipamentos. Para a sua auto-sustentação, a atividade necessita ser alavancada pelo tratamento de outros tipos de resíduos de mercúrio. A técnica de termodessorção revelou que as maiores concentrações de mercúrio na matriz de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas (material potencialmente perigoso e poluente) estão associadas às condições onde prevalecem formas oxidadas (Hg^{1+} e Hg^{2+}). As temperaturas de dessorção do mercúrio contido na matriz do pó de fósforo e no vidro podem alcançar $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $800\text{-}850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Essas temperaturas devem ser levadas em consideração por ocasião do tratamento térmico.

A legislação ambiental brasileira sobre o assunto em pauta está segmentada e restrita a uma lei estadual (Rio Grande do Sul), a dois projetos de lei estaduais (Bahia e Minas Gerais) e a uma lei municipal (São Paulo). Somente as lâmpadas fluorescentes são objeto dessas legislações, o que deixa de fora as lâmpadas tipo HID. Esse trabalho mostra que, em oposição a outros países, não existe no Brasil legislação federal específica que normalize os limites em massa de mercúrio, chumbo e cádmio em lâmpadas nacionais e importadas, nem o gerenciamento dos resíduos por elas gerados, o que acentua os riscos de contaminação aos ecossistemas e à saúde humana. Para controlar o descarte, as opções com o ônus por conta do fabricante (distribuição reversa) e/ou por conta do gerador poluidor devem ser analisadas e ponderadas, em virtude das características, fragilidade e tipo de distribuição do produto.

Diante deste quadro, sugerem-se tópicos para a elaboração da legislação faltante, a se consubstanciar em Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), órgão consultivo e deliberativo do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal.

conservador e corresponde, por exemplo à metade do norte-americano ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$), o que deixa dúvidas sobre o controle das lâmpadas importadas provenientes daquele país, bem como as oriundas de outros, principalmente do sudeste asiático.

Dentre as técnicas de tratamento de resíduos de lâmpadas, o destaque vai para a reciclagem, via tratamento químico ou térmico. Essa atividade, além de ser ambientalmente correta, possibilita, adicionalmente, a obtenção e reutilização de subprodutos. Entretanto, no caso específico da reciclagem térmica, o custo operacional é ainda elevado em decorrência da estrita dependência de importação de equipamentos. Para a sua auto-sustentação, a atividade necessita ser alavancada pelo tratamento de outros tipos de resíduos de mercúrio. A técnica de termodessorção revelou que as maiores concentrações de mercúrio na matriz de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas (material potencialmente perigoso e poluente) estão associadas às condições onde prevalecem formas oxidadas (Hg^{1+} e Hg^{2+}). As temperaturas de dessorção do mercúrio contido na matriz do pó de fósforo e no vidro podem alcançar $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $800\text{-}850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Essas temperaturas devem ser levadas em consideração por ocasião do tratamento térmico.

A legislação ambiental brasileira sobre o assunto em pauta está segmentada e restrita a uma lei estadual (Rio Grande do Sul), a dois projetos de lei estaduais (Bahia e Minas Gerais) e a uma lei municipal (São Paulo). Somente as lâmpadas fluorescentes são objeto dessas legislações, o que deixa de fora as lâmpadas tipo HID. Esse trabalho mostra que, em oposição a outros países, não existe no Brasil legislação federal específica que normalize os limites em massa de mercúrio, chumbo e cádmio em lâmpadas nacionais e importadas, nem o gerenciamento dos resíduos por elas gerados, o que acentua os riscos de contaminação aos ecossistemas e à saúde humana. Para controlar o descarte, as opções com o ônus por conta do fabricante (distribuição reversa) e/ou por conta do gerador poluidor devem ser analisadas e ponderadas, em virtude das características, fragilidade e tipo de distribuição do produto.

Diante deste quadro, sugerem-se tópicos para a elaboração da legislação faltante, a se consubstanciar em Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), órgão consultivo e deliberativo do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal.

ABSTRACT

This thesis examines the question of environmental contamination stemming from the non-controlled disposal of mercury lamps in Brazil. It comprises a survey research performed with the support of the main public and private companies in Minas Gerais State, extended to other regions and sectors of Brazilian economy. Factors considered include chemical analysis of lamp waste for characterization and classification according to Brazilian norms for solid waste, a patent survey, contact with recycling companies and equipment manufacturers, a mercury speciation study, and an economics analysis for lamp recycling plant installation based on application of thermal processes.

Nowadays the primary fate of mercury-containing lamps is to be disposed of as common trash. Public and industrial sectors are the biggest generators of discharge lamp disposal (HID – *high intensity discharge*) and fluorescent lamps respectively. We verified that companies and public departments, in general, are not aware of adverse effects caused by mercury and due to not having a specific legislation, they do not know how to control this metal waste. In 1998, 48.5 millions mercury lamps were discarded, which represents a pollutant Hg charge of 1,000 kg (20.6 mg per lamp). In 2000, the total amount discarded was 80 millions and this number will be growing up with brazilian program energy conservation. Contamination focus is located in the Southeast region which concentrates 60% of Brazilian economy. Of the total lamps disposed in this region, only 3% have environmentally suitable disposal by means of recycling. This disposal was carried out voluntarily by companies that have a disposal controlled system for their waste and/or by those ones interested in being certified by ISO 14,000.

Analytical results comprove that mercury lamps waste are doubly dangerous (Class I): first, for the mercury itself contained in the fluorescent and mercury vapor lamps, and second for the lead existing in the external bulb glass of mercury vapor lamps. These residues require specific treatment and cannot be freely thrown away in the environment. The present situation is serious and preoccupying, because regulatory limit for mercury ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$) is very conservative and corresponds to half of the North American limit, for instance ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$) what causes some doubts on imported lamps control, mainly the ones from Asia Southeast.

Among the techniques of lamps waste treatment, recycling via chemical or thermal treatment is prominent. This activity, besides being environmentally correct, makes it possible

to obtain and reuse by-products. However, in the specific case of thermal recycling, the operational cost is still high due to strict dependence on equipment importation. In order to be self-supported, the activity needs a booster by other mercury residues types treatment. Thermo-desorption technique has shown that the biggest concentrations of mercury in the phosphorous powder matrix of spent fluorescent lamps (potentially pollutant and dangerous material) are associated to the conditions where oxidized forms prevail (Hg^{1+} e Hg^{2+}). Desorption temperatures of mercury contained in the phosphorous powder matrix and in the glass may reach $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $800\text{-}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively. These temperatures have to be taken into consideration for thermal treatment.

Brazilian environmental legislation about this subject is segmented and restricted to a state law (Rio Grande do Sul), to two states law projects (Bahia and Minas Gerais) and to a municipal law (São Paulo). Only fluorescent lamps are object of these legislations which does not include HID lamps type. This work shows that in comparison to other countries there does not exist in Brazil either a specific federal legislation to norm the limits in mercury, lead and cadmium mass – national or imported lamps – or even to manage wastes associated with their disposal, which increases the risks of contamination in ecosystems and human health. In order to control the disposal, the options with the onus on the manufacturer's expenses (reverse distribution) or polluter generator's expenses must be analyzed and considered as a function of the characteristics, fragility and type of product distribution.

Consideration of the challenge of lamps containing mercury suggests topics for elaboration of missing legislation to consubstantiate in Resolution of the Environment National Council (Conama), consulting and deliberative department of the Environment Ministry, of Hydro Resources and Legal Amazon.

JUSTIFICATIVA E APRESENTAÇÃO

A idéia de propor um Projeto de Pesquisa sobre a contaminação ambiental provocada pelo descarte não-controlado de lâmpadas de mercúrio surgiu no início de 1999, quando estudo destinado ao redirecionamento dos trabalhos a serem realizados pela Supervisão de Meio Ambiente do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN detectou dificuldades na condução de diversos programas de gestão e auditoria ambiental de empresas do setor industrial. A maior parte das empresas tinha dificuldades em gerenciar resíduos de lâmpadas de mercúrio; outras estavam adotando práticas desaconselháveis e somente um grupo reduzido já estava consciente de que a redução e o reciclo eram alternativas melhores que a disposição final destes tipos de resíduos.

Pesquisas bibliográficas preliminares revelaram uma escassez de informações técnicas a respeito deste assunto aqui no Brasil. Os fabricantes de lâmpadas, apesar de manterem um sistema de informação e atendimento ao consumidor, via de regra sempre repassam essas informações num nível muito superficial, alegando que as informações mais técnicas fazem parte de suas estratégias de fabricação e, por isso, se esquivam do assunto.

Face a essas dificuldades, foi elaborado um Projeto de Pesquisa e submetido ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, com o propósito de ser desenvolvido, a nível de doutorado, na área de concentração em Geoquímica Ambiental. O Projeto foi aceito em agosto de 1999.

Logo após a aceitação do Projeto de Pesquisa foi realizada uma visita técnica à fábrica da Osram do Brasil Lâmpadas Elétricas Ltda., em Osasco (SP), ocasião em que foi possível tomar conhecimento, em linhas gerais, do processo de fabricação e manter contatos com a gerência da garantia da qualidade.

Já no segundo semestre de 1999 foi dada continuidade à pesquisa de *survey* junto às principais empresas públicas e privadas do Estado de Minas Gerais, envolvendo o descarte de lâmpadas de mercúrio, o que permitiu ter uma idéia bem concreta a respeito das dificuldades, práticas adotadas e do quantitativo de descarte nos diversos setores da economia mineira.

Com o propósito de obter informações técnicas mais precisas que pudessem ser utilizadas pela comunidade e por órgãos ambientais interessados, o próximo passo foi no

sentido de caracterizar e classificar os resíduos de lâmpadas de mercúrio por meio de análises laboratoriais.

Outro assunto desenvolvido nesta tese resultou da necessidade de se conhecerem as tecnologias disponíveis para o tratamento dos resíduos de lâmpadas de mercúrio. Para isso, foi realizada pesquisa de patentes sobre o assunto e mantidos contatos com fornecedores de equipamentos da Europa e dos EUA, o que possibilitou delinear o corte entre as patentes desenvolvidas e aquilo que tem realmente potencial para utilização sob o ponto de vista comercial.

Em conexão com o assunto anterior, foi desenvolvido estudo sobre a especificação do mercúrio contido em resíduos de lâmpadas fluorescentes. O trabalho envolveu a técnica de termodesorção de mercúrio e objetivou obter subsídios para a adoção da melhor prática para a de-mercurização desses tipos de resíduos.

Face à demanda existente por serviços de de-mercurização e, praticamente, à inexistência de concorrência aqui no Brasil, foi elaborado um estudo econômico-financeiro para instalação de uma usina de reciclagem de lâmpadas de mercúrio, utilizando processo térmico.

Por fim, ao término dos trabalhos realizados, constatou-se que existe uma lacuna na legislação ambiental brasileira, o que tem permitido ou contribuído para a adoção de medidas totalmente errôneas e inadequadas, as quais vêm provocando, certamente, ao longo dos anos, a contaminação de ecossistemas e efeitos deletérios à saúde humana. Para suprir esta lacuna sugerem-se tópicos para a elaboração da legislação federal faltante, a se consubstanciar em Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama).

O escopo desta Tese é composto de 6 (seis) capítulos, bibliografia e anexos, descritos a seguir:

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Aborda o foco do problema, que envolve o descarte não-controlado de lâmpadas de mercúrio usadas e define os objetivos desse trabalho.

Capítulo 2 - REVISÃO DE LITERATURA

Encerra informações básicas sobre os diversos tipos de lâmpadas de mercúrio, usos, produção, descarte, conteúdo de mercúrio em lâmpadas, reciclagem e legislação nacional/internacional.

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta a metodologia de pesquisa utilizada no estudo prospectivo sobre a contaminação ambiental causada pelo descarte de lâmpadas de mercúrio no Estado de Minas Gerais; os materiais e técnicas utilizados para caracterização química, classificação de resíduos e especiação de mercúrio e, por último, a metodologia utilizada na pesquisa de patentes sobre o processamento dos resíduos de lâmpadas de mercúrio.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta e discute os principais resultados obtidos.

Capítulo 5 - ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Apresenta estudo de viabilidade econômico-financeira para instalação de uma usina de reciclagem de lâmpadas de mercúrio no Brasil, utilizando processo térmico.

Capítulo 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Contém conclusões e sugestões pertinentes ao assunto em pauta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

Anexo I - Proposta de Resolução ao Conama.

Anexo II - Carta da Fiemg/CDTN utilizada no estudo prospectivo sobre o descarte de lâmpadas de mercúrio em Minas Gerais.

Anexo III - Carta do deputado Sávio Souza Cruz encaminhada ao Secretário de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais, contendo Proposta de Resolução ao Conama.

Anexo IV – Memórias de Cálculo (Avaliação Econômico-Financeira)

Anexo V – Produção científica.

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Trabalhos gerados pela tese	vii
Notação (Lista de acrônimos)	ix
Resumo	xii
Abstract	xiv
Justificativa e Apresentação	xvi
Índice	xix
Lista de figuras	xxv
Lista de tabelas	xxviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Foco do problema	2
1.2 Objetivo deste trabalho	2
1.2.1 Objetivo primário	3
1.2.2 Objetivos secundário	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Produtos que contêm mercúrio em um resíduo sólido urbano dos EUA	5
2.2 Lâmpadas de mercúrio	6
2.2.1 Uso, produção e descarte	6
2.3 Informações básicas sobre lâmpadas de mercúrio	7
2.3.1 Lâmpada fluorescente	8
2.3.2 Lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID)	10
2.3.3 Funcionamento de uma lâmpada	12
2.3.4 Lâmpadas mais utilizadas sob o ponto de vista comercial	13
2.3.5 Pesquisa de materiais alternativos e/ou substitutivos para aplicação em lâmpadas de mercúrio	14
2.4 Conteúdo de mercúrio em lâmpadas de mercúrio	15

2.5	Legislação ambiental sobre descarte de lâmpadas de mercúrio	16
2.5.1	Nos Estados Unidos da América – EUA	16
2.5.2	Na Europa	20
2.5.3	No Brasil	21
2.5.4	Legislação no Estado da Bahia.....	22
2.5.5	Legislação no Estado de Minas Gerais.....	22
2.5.6	Legislação no Estado do Rio Grande do Sul.....	23
2.5.7	Legislação na Cidade de São Paulo.....	24
2.6	Tratamento de resíduos de lâmpadas de mercúrio	24
2.6.1	Processo de reciclagem.....	25
2.6.2	Fase preparatória (Processo físico).....	25
2.6.3	Fase subsequente (Recuperação do mercúrio contido no resíduo) ..	26

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS29

3.1	Revisão de literatura	29
3.2	Pesquisa de patentes.....	29
3.3	Estudo prospectivo sobre descarte de lâmpadas de mercúrio	31
3.4	Materiais e métodos utilizados na caracterização e classificação de resíduos de lâmpadas de mercúrio	33
3.4.1	Caracterização dos principais constituintes de lâmpadas de lâmpadas de mercúrio	33
3.4.1.1	Difração de Raios-X.....	33
3.4.1.2	Espectrometria de fluorescência de Raios-X.....	34
3.4.1.3	Espectrometria de energia de Raios-X por excitação de raios gama (Kevex)	34
3.4.1.4	K ₀ -ativação neutrônica paramétrica	35
3.4.1.5	Espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio (CV-AAS) e espectrometria de absorção atômica convencional (AAS).....	36
3.4.1.6	Espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES).....	36
3.4.1.7	Gravimetria	36
3.4.1.8	Espectrometria de absorção molecular (Colorimetria) ..	37

3.4.1.9	Potenciometria	38
3.4.1.10	Análises físicas (densidade e análise granulométrica) ..	39
3.4.1.11	Termodesorção de mercúrio	41
	3.4.1.11.1 Preparação e análise de amostras dopadas	43
	3.4.1.11.2 Testes com amostras de vidro	43
3.4.2	Procedimentos analíticos para determinação de Cd, Hg e Pb	43
	3.4.2.1 Análises de mercúrio e cádmio em matriz de pó de fósforo e chumbo em vidro	43
	3.4.2.2 Testes de lixiviação de resíduos (parâmetros: Cd, Hg e Pb)	44
	3.4.2.3 Teste de solubilização de resíduos (parâmetro: Cd)	45
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		46
4.1	Descarte de lâmpadas de mercúrio	46
	4.1.1 Estudo prospectivo sobre descarte de lâmpadas de mercúrio no Estado de Minas Gerais	46
	4.1.1.1 Carta-questionário.....	46
	4.1.1.2 Plano amostral	47
	4.1.1.3 Avaliação das respostas e resultados do levantamento.....	47
	4.1.1.3.1 Avaliação dos dados	48
	4.1.1.3.2 Perfil das empresas e órgãos públicos pesquisados.....	48
	4.1.1.3.3 Descarte de lâmpadas.....	49
	4.1.1.4 Modalidades de descarte (Práticas correntes)	49
	4.1.1.5 Tratamento estatístico dos dados	53
	4.1.1.6 Descarte no Estado de Minas Gerais e região polarizada de Belo Horizonte	55
	4.1.1.7 Estimativa de descarte por empresa/órgão público em outros estados brasileiros.....	55
	4.1.1.8 Divulgação dos dados obtidos (Questão de sigilo).....	57

4.1.2	Estimativa de descarte na Região Sudeste do Brasil e em outros setores da economia brasileira.....	59
4.1.2.1	Estimativa de descarte e mercúrio lançado ao meio ambiente na região sudeste.....	59
4.1.2.2	Estimativa de descarte em setores especiais.....	59
4.1.2.2.1	Estimativa de descarte no setor de iluminação pública	60
4.1.2.2.2	Estimativa de descarte no setor da indústria de autoveículos.....	62
4.1.2.2.3	Estimativa de descarte com relação aos fabricantes de lâmpadas.....	64
4.1.2.2.4	Outros setores potencialmente poluidores que merecem atenção	64
4.2	Caracterização e classificação dos resíduos de lâmpadas de mercúrio.....	64
4.2.1	Constituintes de lâmpadas de mercúrio	64
4.2.2	Classificação dos resíduos	72
4.2.2.1	Análises de mercúrio em resíduos de lâmpadas fluorescentes	72
4.2.2.2	Testes de lixiviação e determinação de mercúrio na massa bruta do resíduo	72
4.2.2.3	Testes de lixiviação e solubilização para cádmio e chumbo	77
4.2.3	Análise do ciclo de vida de lâmpadas de mercúrio	80
4.2.4	Análises físicas.....	80
4.3	Pesquisa de patentes e estado da arte sobre reciclagem de lâmpadas de mercúrio.....	82
4.3.1	Pesquisa de patentes	82
4.3.2	Pesquisa de tecnologia junto aos fabricantes de equipamentos.....	86
4.3.2.1	Equipamentos fabricados pela Mercury Recovery System (MRT)	87
4.3.2.2	Equipamentos fabricados nos EUA	95
4.3.2.3	Equipamentos fabricados na Alemanha	99
4.3.3	Estado da arte sobre reciclagem de lâmpadas de mercúrio	102

4.3.3.1	Panorama mundial	103
4.3.3.2	Empresas recicladoras.....	105
4.3.3.3	Custos de reciclagem e valoração dos subprodutos de reciclagem.....	105
4.4	Estudo de termodessorção de mercúrio	108
4.4.1	Abordagem inicial.....	109
4.4.2	Especificação de mercúrio por TDAAS em matriz de pó de fósforo e em vidro.....	110

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE VIABILIDADE

ECONÔMICO-FINANCEIRA..... 118

5.1	Opções de localização.....	119
5.2	Estratégias a serem adotadas.....	120
5.3	Logística de trabalho.....	121
5.4	Equipamentos necessários e estimativas de custos	122
5.4.1	Estimativa de custos e seleção de equipamentos	124
5.4.2	Estimativa de investimento em infra-estrutura	125
5.4.3	Estimativa de investimento global	127
5.5	Estimativa do quantitativo a ser reciclado	127
5.6	Estrutura organizacional	129
5.6.1	Quadro de pessoal e estimativa de salários.....	129
5.7	Cronograma para implantação de uma usina de reciclagem de lâmpadas.....	131
5.8	Análise econômico-financeira.....	133
5.8.1	Definições e condições de contorno.....	133
5.8.2	Avaliação dos cenários idealizados.....	135

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... 137

BIBLIOGRAFIA 151

ANEXOS 160

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1** - Principais constituintes de uma lâmpada fluorescente tubular..... 9
- Figura 2.2** - Principais constituintes de uma lâmpada fluorescente compacta..... 10
- Figura 2.3** - Principais constituintes de uma lâmpada a vapor de mercúrio..... 11
- Figura 2.4** - Esquema de funcionamento de uma lâmpada fluorescente..... 13
- Figura 2.5** - Ciclo das operações envolvidas nas fases de separação
e tratamento térmico 27

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1** - Desenho esquemático do sistema de termodessorção/absorção
atômica (TDAAS) 42

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1** - Número total de lâmpadas de mercúrio descartadas por mês
em cada um dos setores pesquisados (percentual contabilizado
por setor, de acordo com as modalidades de descarte)..... 50
- Figura 4.2** - Diagrama global de descarte mensal de lâmpadas
(fluorescente + HID), onde cada ponto representa
o descarte de uma empresa/órgão público 56
- Figura 4.3** - Estimativa projetada para o número mediano de descarte mensal
de lâmpadas (fluorescente + HID) para diversos estados brasileiros,
com base no descarte mediano de empresas/órgãos públicos
do Estado de Minas Gerais e nos IPC dos estados correspondentes 58
- Figura 4.4** - Localização geográfica das empresas concessionárias de energia elétrica
associadas à Abradee 61

Figura 4.5 - Fluxograma de coleta e tratamento de lâmpadas fluorescentes (MRT).....	88
Figura 4.6 - Fluxograma de operações utilizado no processador C/S, fabricado pela MRT	89
Figura 4.7 - Fluxograma do processo de destilação – MRT <i>standard distiller</i>	90
Figura 4.8 - Fluxograma utilizado no processamento de lâmpadas HID (MRT).....	92
Figura 4.9 - Processador de lâmpadas fluorescentes fabricado pela MRT, modelo C/S, montado em um <i>container</i> de 20'. Na foto inferior, vista interna do <i>container</i>	93
Figura 4.10 - Processador de lâmpadas HID, fabricado pela MRT	96
Figura 4.11 - Unidade de destilação de mercúrio, modelo <i>standard</i> , fabricada pela MRT	96
Figura 4.12 - Processador de lâmpadas fluorescentes, modelo 3600, fabricado pela Dytec	97
Figura 4.13 - Processador de lâmpadas fluorescentes, modelo LSS1, fabricado pela AERC	97
Figura 4.14 – Destilador (foto superior) e sistema de destilação quádrupla (foto inferior) desenvolvidos pela <i>Bethlehem Apparatus Company</i>	100
Figura 4.15 - Fluxograma do processo de destilação (<i>Bethlehem Apparatus Company</i>).....	101
Figura 4.16 - Termogramas de uma mistura de pó de fósforo procedente de diversas lâmpadas fluorescentes: (a) antes do tratamento térmico e (b) após tratamento térmico.....	110
Figura 4.17 - Termogramas de amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes dopadas com padrões de mercúrio	112
Figura 4.18 - Termogramas de amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes	114

Figura 4.19 - Termograma de amostra de vidro de lâmpada fluorescente usada/queimada	117
--	-----

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - População e posicionamento geográfico das regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte	120
Figura 5.2 - Distribuição dos equipamentos em uma usina de reciclagem de lâmpadas (layout de equipamentos)	123
Figura 5.3 - Dimensão do mercado total de lâmpadas a serem recicladas no Brasil e mercado potencial da Região Sudeste.....	129
Figura 5.4 - Estrutura organizacional para uma usina de reciclagem de lâmpadas (layout organizacional).....	130
Figura 5.5 - Cronograma de implantação para uma usina de reciclagem de lâmpadas.....	132

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Produtos que contêm mercúrio em um resíduo sólido urbano dos EUA.....	5
Tabela 2.2 - Conteúdo de mercúrio em uma lâmpada tubular de 40 W.....	15
Tabela 2.3 - Conteúdo e especificação de mercúrio em lâmpadas fluorescentes de 40 W.....	16
Tabela 2.4 - Padrões ambientais para o mercúrio em diversos meios/matrizas, nos EUA.....	17
Tabela 2.5 - Legislação ambiental e reciclagem de resíduos de lâmpadas de mercúrio em países da Europa.....	21

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Questionário utilizado na pesquisa de <i>survey</i>	47
Tabela 4.2 - Empresas e setores pesquisados, quantitativo de descarte de lâmpadas de mercúrio e modalidades de descarte no Estado de Minas Gerais	50
Tabela 4.3 - Valores de referência e síntese numérica para o descarte mensal de lâmpadas fluorescentes e de descarga no Estado de Minas Gerais	54
Tabela 4.4 - Índice de Potencial de Consumo (IPC) para cada estado brasileiro	57
Tabela 4.5 - Estimativa de descarte de lâmpadas de mercúrio em empresas associadas à Abradee	62
Tabela 4.6 - Estimativa de descarte de lâmpadas fluorescentes na indústria brasileira de automóveis.....	63

Tabela 4.7 - Composição aproximada de vidros utilizados em lâmpadas de mercúrio	66
Tabela 4.8 - Análise elementar de pó de fósforo utilizado em lâmpadas de mercúrio	67
Tabela 4.9 - Concentração de mercúrio em matriz de pó de fósforo de lâmpada fluorescente de 40 W.....	73
Tabela 4.10 - Concentração de mercúrio na massa bruta de resíduos de lâmpadas fluorescentes de 40 W	73
Tabela 4.11 - Testes de lixiviação em resíduos de lâmpadas fluorescentes. Parâmetro analisado: mercúrio total em lixívia.....	73
Tabela 4.12 - Classificação dos resíduos de lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W, conforme Norma ABNT – NBR 10.004. Parâmetro analisado: mercúrio total em matriz sólida	75
Tabela 4.13 - Testes de lixiviação e solubilização em resíduos de lâmpadas fluorescentes de 40 W. Parâmetro analisado: cádmio	78
Tabela 4.14 - Classificação dos resíduos de lâmpadas a vapor de mercúrio, conforme Norma ABNT – NBR 10.004. Parâmetro analisado: chumbo	79
Tabela 4.15 - Análises granulométricas do pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes de 40 W, em <i>Cyclosizer Warmam</i>	81
Tabela 4.16 - Descarte e reciclagem de lâmpadas de mercúrio em alguns países da Europa.....	104
Tabela 4.17 - Relação dos principais fabricantes de equipamentos e recicladoras nos EUA, Europa e Brasil	106
Tabela 4.18 - Quantificação dos principais componentes de lâmpadas de mercúrio	107

Tabela 4.19 - Características das amostras submetidas aos testes de termodesorção, concentração e especiação do mercúrio contido em lâmpadas fluorescentes tubulares usadas/queimadas e novas	116
---	-----

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - População do município central e das regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte	119
Tabela 5.2 - Relação de equipamentos/materiais necessários a uma usina de reciclagem de lâmpadas	122
Tabela 5.3 - Custo de equipamentos importados	124
Tabela 5.4 – Custo de equipamentos disponíveis no mercado nacional	126
Tabela 5.5 - Estimativa de investimentos em infra-estrutura	127
Tabela 5.6 - Quantitativo de lâmpadas a ser reciclado mensalmente e anualmente em uma usina	128
Tabela 5.7 - Pessoal técnico-administrativo necessário a uma usina de reciclagem de lâmpadas	130
Tabela 5.8 - Estimativa de salários	131
Tabela 5.9 - Síntese geral (Avaliação econômico-financeira).....	136

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Assistimos, nesse final de milênio, a um crescer de mudanças adaptativas à nova ordem mundial. Entre estas, uma – a mentalidade ambientalista – reveste-se de especial relevância, na medida em que se identifica com as necessidades de competitividade, produtividade, segurança e qualidade, passando assim a constituir-se em fator estratégico. E, por isso mesmo, as questões ambientais passam a ser encaradas como oportunidades de desenvolvimento, seja pelo uso de tecnologias ambientalmente seguras, seja pela racionalização de uso do recurso natural.

Hoje, há uma reconceituação do padrão de concorrência-qualidade dentro do contexto de Desenvolvimento Sustentado. Conciliar a competitividade com a proteção ambiental vem sendo um importante desafio das empresas modernas. No meio empresarial, de um modo geral, a responsabilidade ambiental penetra e consolida-se nas organizações que passaram e/ou passam a adotar instrumentos voluntários de controle ambiental. O gerenciamento ambiental passou a ser uma questão global. A comunidade mundial será desafiada, neste novo milênio, a promover o balanço do desenvolvimento econômico com a proteção ambiental.

A destinação ambiental de resíduos urbano-industriais vem sendo considerada como um dos grandes problemas da sociedade moderna que, em virtude do grande consumismo, é geradora de enorme quantidade de resíduos sólidos. Um dos problemas ambientais que tem chamado a atenção pela sua gravidade, principalmente nos países de Primeiro Mundo, é a contaminação causada pelo descarte de produtos que contêm mercúrio. Embora o mercúrio possua inúmeras características benéficas e tenha centenas de aplicações práticas, muitos cientistas comprovam que alguns compostos de mercúrio são neurotoxinas potentes. Certas formas de mercúrio podem, adversamente, afetar organismos expostos a ele e, em altas concentrações, são capazes de danificar o sistema nervoso central do homem (Usepa 1993).

Regulamentações ambientais cuidadosas têm sido elaboradas e colocadas em prática, principalmente nos países do Hemisfério Norte, no sentido de orientar o descarte de resíduos mercuriais e, ao mesmo tempo, incentivar o desenvolvimento de tecnologias que possam remover esse metal, seguramente dos produtos ao fim de sua vida útil, minimizando, desta forma, seus

efeitos nocivos ao meio ambiente. Ações pró-ativas, no sentido de minimizar estes efeitos nocivos, vêm sendo implantadas e/ou implementadas em muitos países da Europa.

No Brasil, a preocupação com o mercúrio sempre esteve voltada para os garimpos de ouro. Pouco se conhece a respeito da problemática que envolve o descarte do mercúrio presente em resíduos urbano-industriais. Dentre estes, os produtos eletro-eletrônicos, particularmente as lâmpadas de mercúrio, merecem atenção especial em decorrência das particularidades que envolvem o produto em si, quantitativo descartado, conteúdo de mercúrio presente nos resíduos e práticas de descarte.

1.1 - FOCO DO PROBLEMA

As lâmpadas de mercúrio (fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores) são amplamente utilizadas para prover uma fonte eficiente de luz. Essas lâmpadas contêm, no seu interior, quantidades variáveis de mercúrio, elemento vital para a produção de luz visível. Quando imprópriamente manejadas e descartadas ou abandonadas em depósitos de lixo, tais lâmpadas liberam mercúrio no meio ambiente. Uma vez liberado, o mercúrio pode acumular-se em sedimentos, lagos e outros corpos d'água, onde então pode ser convertido em metilmercúrio (CH_3Hg^+ - composto orgânico), por bactérias metanogênicas, em ambiente moderadamente redutor (Malm 1991). O metilmercúrio formado pode entrar na cadeia alimentar pela rápida difusão e forte ligação com as proteínas da biota aquática, atingindo sua concentração máxima em tecidos de peixes devido à biomagnificação – crescimento exponencial da concentração ao longo da cadeia trófica (Minnesota Pollution Control Agency 1994). O homem, por estar situado no topo da cadeia alimentar e por ser um grande consumidor de peixes e de outros organismos aquáticos, pode ser contaminado (Nriagu 1990, Malm 1991, Foulke 1994).

1.2 - OBJETIVO DESTES TRABALHOS

O descarte e a disposição inadequada de um resíduo constituem foco de contaminação das matrizes água, ar e solo, numa sobrecarga poluidora de caráter contínuo e muitas vezes irreversível. Considerando que uma eliminação pura e simples de um resíduo é quase impossível, resta a possibilidade de reciclá-lo ou de integrá-lo de maneira harmônica ao meio ambiente.

Com base nesta consideração, o presente trabalho tem por objetivos:

1.2.1 - Objetivo primário

- Examinar a questão que envolve a contaminação ambiental provocada pelo descarte não-controlado de lâmpadas de mercúrio no Brasil.

1.2.2 - Objetivos secundários

- Identificar os principais segmentos geradores de descarte e sua distribuição geográfica.
- Identificar as modalidades de descarte (práticas correntes) e políticas de gestão de resíduos adotadas pelas diversas empresas e órgãos públicos.
- Quantificar o descarte processado pelos diversos geradores, de acordo com as modalidades encontradas.
- Identificar as necessidades e expectativas dos geradores quanto à destinação final.
- Contextualizar o descarte na região metropolitana de Belo Horizonte, a fim de se obterem parâmetros que possam ser extrapolados para outras regiões e áreas do setor produtivo.
- Caracterizar e classificar os resíduos de lâmpadas de mercúrio, de acordo com as normas brasileiras vigentes.
- Identificar as tecnologias disponíveis para a descontaminação de lâmpadas de mercúrio (*de-mercurização*).
- Analisar a viabilidade de implantação de um sistema de descontaminação de lâmpadas, sob o ponto de vista técnico, econômico e financeiro.
- Estudar a legislação brasileira sobre o assunto e, se possível, apresentar uma proposta.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

A agressão antrópica ao meio ambiente tem sido comprovada nas suas diversas formas e teve maior incremento a partir da Revolução Industrial. O uso indiscriminado do mercúrio normalmente tem-se mostrado como um dos exemplos mais representativos do que o homem pode causar aos ciclos naturais (Nriagu 1990, 1999).

A exposição mercurial tem provocado profundos efeitos sobre a saúde humana. Antologicamente, um dos mais trágicos exemplos de envenenamento pelo mercúrio aconteceu na região da Baía de Minamata, no sudoeste do Japão. Em 1906, uma planta química de ácido acético e derivados da Chisso Corporation começou a descartar nos seus efluentes o metilmercúrio (subproduto da síntese do acetaldeído). O metilmercúrio lançado no efluente contaminou a biota marinha e águas de sua vizinhança, chegando até a população pela ingestão de peixes e frutos do mar. Mulheres grávidas foram expostas a altos níveis de mercúrio e, em consequência, seus descendentes desenvolveram múltiplos sintomas neurológicos (microcefalia, hipoplasia e atrofia do cérebro). Em 1956, a “Doença de Minamata” foi oficialmente descoberta quando uma criança foi hospitalizada com mãos e pés paralisados. Em 1992, mais de 36 anos após a descoberta oficial do problema, o número de pessoas oficialmente diagnosticadas com tal doença totalizou 2.252; 1.043 foram vítimas fatais e outras 12.127 pessoas esperavam ser testadas (Center for Health, Environment and Justice 1997, Justus 1998).

Outro exemplo de envenenamento por mercúrio ocorreu no Iraque, entre 1971 e 1972, quando sementes de trigo tratadas com fungicidas à base de mercúrio foram usadas na fabricação de pão, resultando em mais de 500 mortes e 6.000 hospitalizações. Casos semelhantes ocorreram no Irã, Paquistão e Guatemala (Bakir et al. 1973, Malm 1991).

Mais recentemente, a literatura mundial tem dado destaque aos riscos à saúde humana provocados pelo uso de amálgamas dentários (Associação Sueca dos Pacientes de Mercúrio Odontológico 1998). Outro destaque relatado, com bastante repercussão no meio científico, é o acidente que ocorreu com Karem E. Wetterhahn, renomada pesquisadora do Dartmouth College (EUA), que morreu vítima de intoxicação por dimetilmercúrio, em 1997 (Scienceweek 1999).

No Brasil, acidentes com mercúrio vêm ocorrendo periodicamente nas áreas de garimpo de ouro, principalmente nos rios amazônicos, comprometendo seriamente o ambiente aquático. Exemplos provocados por indústrias foram registrados no Estado de Pernambuco, quando o estuário do rio Botafogo foi contaminado pelos efluentes das indústrias da Companhia Igarassu (produtora de soda e cloro), o que comprometeu a água, sedimentos e fauna aquática (Cetesb 1981). Em 1976, derramamento de grande porte da lixívia negra, contendo mercúrio da Indústria Champion Papel e Celulose S. A., contaminou o rio Mogi-Guaçu, em São Paulo, ocasionando a mortandade de peixes e elevação da concentração de mercúrio no sistema aquático (Vargas Boldrinni et al. 1973).

2.1 - PRODUTOS QUE CONTÊM MERCÚRIO EM UM RESÍDUO SÓLIDO URBANO DOS EUA

Os produtos que contêm mercúrio, ao fim de sua vida útil são considerados resíduos perigosos. O mercúrio contido nesses produtos não desaparecerá e poderá ser liberado para o meio ambiente, seja através das plantas de tratamento de efluentes (industriais e municipais) e incineradores de lixo sólido, seja através da água lixiviada de aterros sanitários/lixões (chorume). Na Tabela 2.1 é mostrada a distribuição dos principais produtos que contêm mercúrio em um resíduo sólido urbano nos EUA (Usepa 1996). Pilhas e baterias secas representam de longe a maior contribuição com 71,99%; em segundo lugar, equipamentos elétricos, inclusive lâmpadas de mercúrio, contribuem com 13,70%. Os dados apresentados servem como referência, já que uma estatística dessa natureza ainda não é disponível para a realidade brasileira.

Tabela 2.1 – Produtos que contêm mercúrio em um resíduo sólido urbano dos EUA.

Produto	%
Pilhas/Baterias	71,99
Equipamentos elétricos	13,70
Termômetros	6,89
Termostatos	3,30
Pigmentos	1,22
Uso odontológico	1,18
Resíduos de pintura	0,94
Interruptores de mercúrio	0,77
TOTAL	100,00

2.2 - LÂMPADAS DE MERCÚRIO

Desde que a primeira fonte de luz artificial foi descoberta por Thomas Alva Edson, em 1854, contínuos esforços têm sido empregados para criar melhores e efetivas fontes de luz artificial.

A substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas de mercúrio é cada dia maior, o que vem acarretando uma importante redução no consumo de energia elétrica, podendo, no caso da substituição por lâmpadas fluorescentes compactas, proporcionar uma redução de até 80%, com melhoria significativa no conforto e na iluminação (Dinheiro Vivo 1998). A redução desse consumo, em países com termelétricas à base de combustíveis fósseis, implica uma diminuição sensível do aporte antrópico de mercúrio (Usepa 1997a).

Por outro lado, a iluminação eficiente e a melhoria contínua das fontes de luz artificial devem considerar como foco importante não só o custo de produção, mas também a proteção ao meio ambiente, ameaçado pelo mercúrio utilizado em lâmpadas.

2.2.1 - Uso, produção e descarte

Nos EUA, as lâmpadas fluorescentes são, predominantemente, utilizadas nos setores comercial e industrial, o que perfaz 80% do total de uso (Nema 1994). Em segundo lugar, com 12%, aparecem o setor doméstico e pequenos negócios; por último, uma pequena porção, representando consumidores tais como lojas de departamento, supermercados, drogarias e estabelecimentos bancários, com 8%. No Brasil, não existe uma estatística a respeito desses canais de distribuição. Entretanto, por analogia, os setores industrial, comercial e público representam, certamente, os principais usuários. Já o uso doméstico deve figurar em último lugar, uma vez que nele a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes é ainda muito pequena. A tendência atual é ocorrer um crescimento acentuado no setor residencial em decorrência do plano de contingência de energia elétrica posto em prática em meados do ano 2001, o que acelerou a troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas.

Em 1998, a produção brasileira de lâmpadas de mercúrio foi da ordem de 48,5 milhões de lâmpadas, conforme dados apresentados pela Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux 1998), sendo 32 milhões de lâmpadas fluorescentes, 9 milhões de lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, mista, vapor de sódio e vapores multimetálicos) e 7,5 milhões de lâmpadas fluorescentes compactas (vide estatística para o ano 2000 – Capítulo 3.3). Os fabricantes de

lâmpadas associados à Abilux são: Osram, Philips, Sylvania, General Electric, Dynacom, Fujilux e Sadokin. O descarte anual de lâmpadas é da mesma ordem de grandeza do número de produção, ou seja, para cada lâmpada produzida tem-se o descarte de uma lâmpada usada/queimada (relação 1:1). A tendência dos fabricantes de lâmpadas é a produção com estoque mínimo, reduzindo custos de estocagem e risco de quebra do produto. Considerando tão somente a produção interna e uma população de 169.544.443 habitantes (IBGE 2001), o descarte *per capita* brasileiro é de 0,3 lâmpadas/habitante.ano. Os principais pólos de consumo de lâmpadas de mercúrio e, conseqüentemente, de geração de resíduos de lâmpadas, estão situados nas regiões das grandes metrópoles e centros industriais adjacentes, em especial na Região Sudeste (Rio-São Paulo-Minas), que concentra o maior pólo industrial do país e 40,9% da população brasileira. Os setores industrial e comercial, no que se refere ao descarte de lâmpadas fluorescentes, e o setor público, no que se refere ao descarte de lâmpadas de vapor (iluminação pública), são de longe os maiores geradores. Por analogia com a situação nos EUA, estima-se que os setores acima representam mais de 90% do descarte realizado no Brasil.

Nos EUA, a produção de lâmpadas fluorescentes é da ordem de 1 bilhão de unidades/ano. A United States Environmental Protection Agency (Usepa) estima que anualmente, 756 milhões de lâmpadas de mercúrio dão entrada no sistema de gerenciamento de resíduos (Usepa 1997a). Considerando uma população da ordem de 260 milhões de habitantes, o descarte *per capita* norte-americano é de 2,9 lâmpadas/habitante.ano, o que representa, aproximadamente, 10 vezes o descarte brasileiro. Outro dado importante diz respeito do destino final para essas lâmpadas. De acordo com estudo preparado em 1992 pelo Research Triangle Institute (Truesdale et al. 1993), 82% das lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas nos EUA eram dispostas em aterros, 16% eram incineradas e somente 2% eram recicladas. Hoje a reciclagem alcança 12-15% do total descartado, ou seja, crescimento líquido de até 650% (Nema 2000).

2.3 - INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

No Brasil, são produzidos mais de 500 tipos de lâmpadas, distribuídos em quatro grandes grupos de produtos (lâmpadas para foto/cine/ótica; automotivas e de sinalização; incandescentes e de descarga), a fim de atender a grande variedade de aplicações exigidas pelo mercado consumidor (Osram 1996a). Dentre esses, o grupo de lâmpadas de descarga que utilizam mercúrio é o foco deste trabalho.

As lâmpadas de mercúrio, também denominadas lâmpadas de descarga, podem ser classificadas, basicamente, em dois grandes grupos: (1) lâmpadas fluorescentes de baixa pressão e (2) lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID – *high intensity discharge*), tais como: vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores halogenados (Loja Elétrica 1999). As lâmpadas fluorescentes são mais utilizadas em ambientes fechados como, por exemplo, oficinas, fábricas, escritórios, escolas, hospitais, depósitos, garagens e residências, onde se exige melhor distinção de cores, enquanto as lâmpadas HID em ambientes externos, para a iluminação de vias públicas, estradas, praças, parques, jardins e pátios de indústrias. As lâmpadas de descarga contêm quantidades variáveis de mercúrio, constituinte vital e necessário ao funcionamento das mesmas.

2.3.1 - Lâmpada fluorescente

A lâmpada fluorescente convencional é constituída, basicamente, pelos seguintes componentes: (1) bulbo de vidro – invólucro externo da lâmpada, geralmente na forma tubular; (2) pós de fósforos – materiais fluorescentes que revestem a parede interna do bulbo de vidro. Os fósforos são destinados a absorver as radiações ultravioletas de pequeno comprimento de onda (UV-C) e transformá-las em luz visível. São compostos químicos inorgânicos, processados sob a forma de pó e depositados na superfície interna de lâmpadas fluorescentes e em determinados tipos de lâmpadas de mercúrio de alta pressão. A mistura química de diversos fósforos determina o índice de reprodução de cores (IRC), ou seja, a capacidade de reproduzir cores. As primeiras lâmpadas fluorescentes utilizaram minerais fluorescentes, como por exemplo willemita - Zn_2SiO_4 , emissor verde, ativado por Mn^{2+} . Após 1940, foram desenvolvidos os halofósforos, ou seja, fluorcloroapatita - $Ca_5(PO_4)_3(Cl, F)$ ativada por Sb^{3+} e Mn^{2+} , e a partir da década de 70 foram introduzidos os fósforos de terras raras, numa mistura de três fósforos, conhecidos como trifósforos: Y_2O_3 (emissor vermelho), $CeMgAl_{11}O_{19}$ (emissor verde) e $BaMgAl_{10}O_{17}$ (emissor azul), ativados por Eu^{3+} , Tb^{3+} e Eu^{3+} , respectivamente. Hoje, as lâmpadas fluorescentes de alta eficiência utilizam fósforos fabricados sinteticamente (Srivastava e Sommerer 1998). Detalhes técnicos sobre os diversos fósforos de aplicação em lâmpadas fluorescentes e de vapor de mercúrio podem ser encontrados no *site* da Osram & Sylvania (2000). A deposição desse pó em lâmpadas fluorescentes (aproximadamente, 4 a 6 $mg.cm^{-2}$) é feita eletrostaticamente (Woodward et al. 1999, Osram 2000); (3) cátodos – em cada extremidade do tubo existe um cátodo, o qual é feito de fio de tungstênio enrolado em forma de hélice e recoberto com material denominado

mistura emissiva, que ajuda o cátodo a emitir elétrons mais facilmente; (4) base – cada cátodo é conectado a uma base da lâmpada, a qual se encontra cimentada em cada extremidade do tubo, para fazer a ligação com o circuito elétrico e prender a própria lâmpada; (5) gás de enchimento – o tubo é preenchido com pequena quantidade de gás inerte, geralmente argônio ou uma mistura de argônio e nitrogênio, argônio e criptônio ou criptônio e neônio e (6) mercúrio – em adição ao gás de enchimento, existe ainda dentro do tubo o mercúrio (pequena parte sob a forma de vapor e a quase totalidade sob a forma metálica) (Truesdale et al. 1993). Na Figura 2.1 são mostrados os diversos componentes de uma lâmpada fluorescente tubular.

As lâmpadas fluorescentes são oferecidas em uma gama tão extensa, em termos de tipos, cores, formas e tamanhos, que cobrem um número quase que infinito de necessidades da iluminação. Do ponto de vista comercial, essas lâmpadas estão disponíveis em várias potências (de 15 a 110 W), várias tonalidades de cor e diâmetros (T5, T8, T10 e T12, onde T designa a forma tubular da lâmpada e o número, o diâmetro em múltiplos de 1/8"; T12, $\phi = 1\frac{1}{2}$ " = 38 mm; T10, $\phi = 1\frac{1}{4}$ " = 32 mm e T8, $\phi = 1$ " = 25 mm), para operação rápida, convencional ou eletrônica.

A vida útil de uma lâmpada fluorescente é da ordem de 7.500 horas (Osram 1990). A partir da década de 80, aparecem as lâmpadas fluorescentes compactas providas de pós tricromáticos, que consomem um quinto de energia em relação às lâmpadas incandescentes comuns e têm vida média útil de 10.000 horas (Osram 1996b).

Na Figura 2.2 encontram-se apresentados os principais componentes de uma lâmpada fluorescente compacta (Finn e Ouellette 1992).

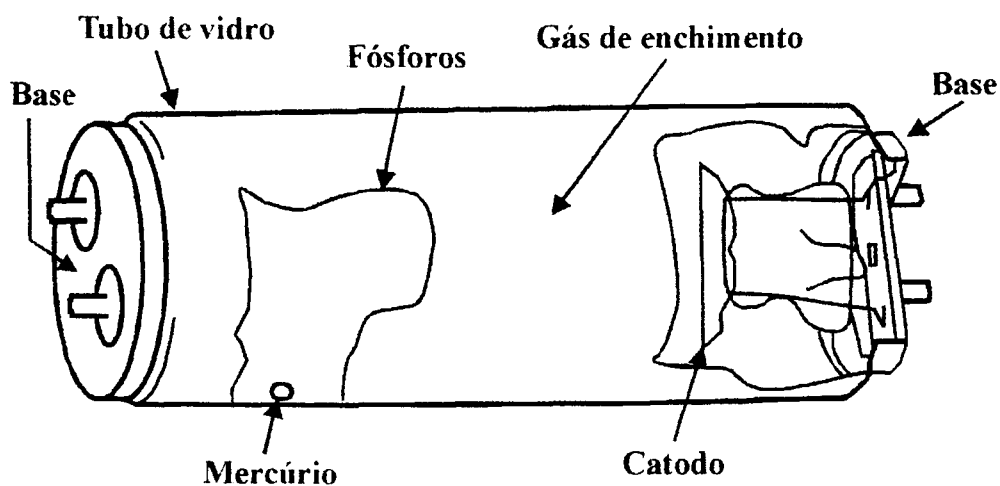


Figura 2.1 – Principais constituintes de uma lâmpada fluorescente tubular (Truesdale et al. 1993).

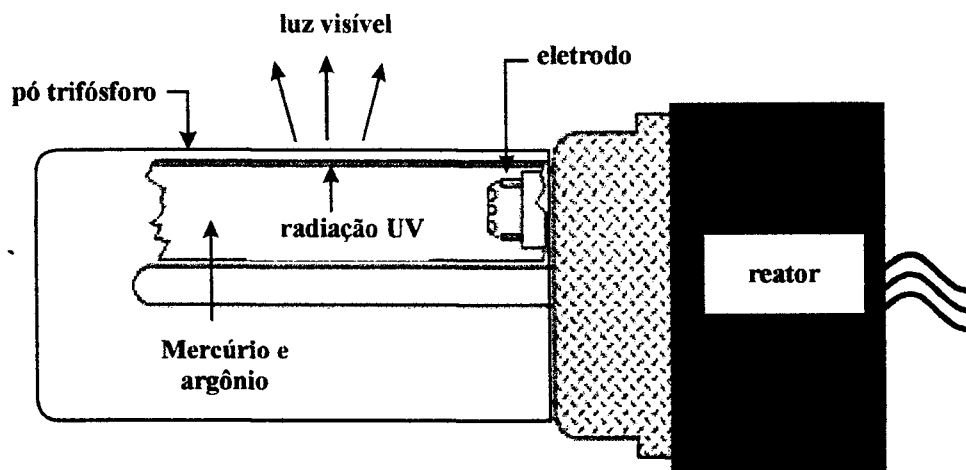


Figura 2.2 – Principais constituintes de uma lâmpada fluorescente compacta (Finn e Ouellette 1992).

2.3.2 - Lâmpadas de descarga de alta intensidade (HID)

As lâmpadas de descarga de alta pressão, também chamadas de HID, são divididas em três famílias distintas: (1) vapor de mercúrio, podendo-se incluir neste grupo as de luz mista; (2) vapores metálicos (halogêneos metálicos) e (3) vapor de sódio. Essas lâmpadas são constituídas de duas partes principais: bulbo externo e tubo interno (*pellet*), além de eletrodos, gás de enchimento e base (soquete). As lâmpadas HID operam a uma pressão ligeiramente inferior à pressão atmosférica, o que significa que implosões podem ocorrer quando as lâmpadas são quebradas (Truesdale et al. 1993, Battye et al. 1994).

A lâmpada a vapor de mercúrio (Figura 2.3) consiste de: (1) tubo interno, denominado de tubo de descarga ou tubo de arco (*pellet*), de quartzo (vidro sílica), contendo uma mistura gasosa de argônio e nitrogênio e uma pequena quantidade de mercúrio elementar e quatro eletrodos, dois principais e dois de partida (auxiliares), colocados em suas extremidades; (2) bulbo externo, geralmente ovóide, que envolve o tubo interno, constituído de vidro soda, sendo revestido internamente por uma camada de fósforo (fosfato de ítrio vanadato). O fósforo transforma a radiação ultravioleta em luz visível. Este bulbo evita, assim, a passagem dos raios ultravioletas para fora da lâmpada e (3) suporte interno de arame, que é utilizado para fazer a conexão dos eletrodos com a base da lâmpada (soquete). A lâmpada possui, também, um resistor de partida para limitar a corrente que flui para o eletrodo de partida (Osram & Sylvania 2000, Philips 1996). A vida útil desse tipo de lâmpada é da ordem de 9.000 horas (Osram 1990, Philips 1996)

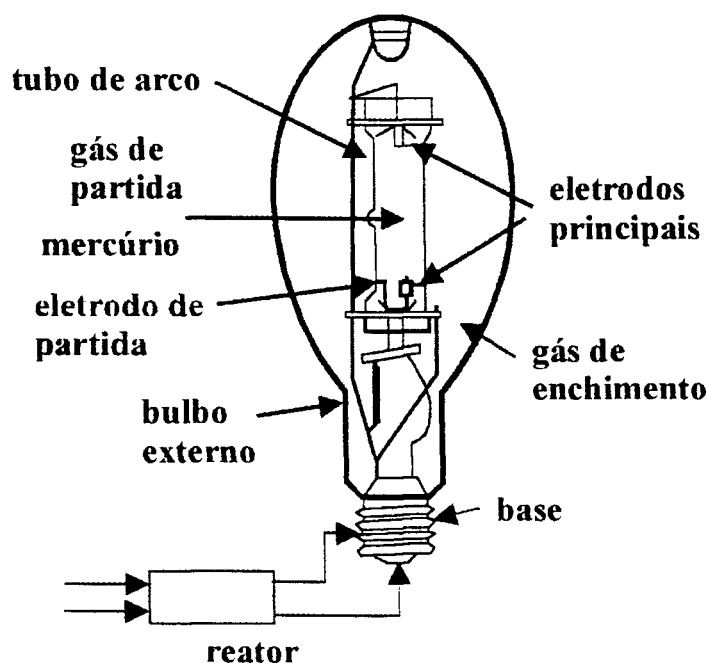


Figura 2.3 – Principais constituintes de uma lâmpada a vapor de mercúrio (Loja Elétrica 1999).

A lâmpada de luz mista é, basicamente, uma lâmpada de vapor de mercúrio (Philips 1996). Em série com o tubo de descarga, existe um filamento de tungstênio, que além de ser um dispositivo limitador de corrente, substituindo o reator, age como fonte de luz de cor quente, não apenas contribuindo para a saída luminosa total, mas também melhorando a impressão geral de cor. A vida útil de uma lâmpada de luz mista é da ordem de 6.000 horas (Osram 1996a).

A lâmpada de multivapores metálicos é basicamente uma lâmpada de mercúrio, à qual são adicionados halogêneos metálicos (iodeto de escândio, iodeto de sódio e outros). Os halogêneos permitem tornar contínuo o espectro da descarga elétrica e determinam as características de produção de luz, resultando na melhoria da reprodução de cor e de eficiência. As lâmpadas multivapores apresentam ainda outra característica que as distinguem das lâmpadas de mercúrio – existência de uma camada reflexiva branca fluorescente nas extremidades do tubo interno, o que permite o seu reacendimento imediato mesmo com a lâmpada quente. Todas as lâmpadas multivapores são projetadas para trabalhar com ignitor para halogêneos metálicos (Loja Elétrica 1999). A vida útil dessas lâmpadas é da ordem de 6.000 horas (Osram 1996b) e seu preço é o mais elevado entre as lâmpadas de alta pressão.

A lâmpada a vapor de sódio tem constituição semelhante à da lâmpada a vapor de mercúrio, porém o tubo interno é constituído de óxido de alumínio sinterizado (alumina translúcida). Este tubo contém pequenas quantidades de amálgama de Na-Hg, cuja relação Na/Hg varia de 1/10 a 1/3 (Truesdale et al. 1993). O gás de preenchimento no tubo cerâmico é um gás xenônio de alta pureza, ou mistura de neônio e argônio. O bulbo externo (ovóide ou tubular) é feito de vidro-mole para as baixas potências, ou vidro-duro para elevadas potências. A parede interna desse bulbo é coberta eletrostaticamente por uma camada uniforme de pó difusor (pirofosfato de cálcio), o que assegura alto rendimento durante a sua vida útil. Esses tipos de lâmpadas são disponíveis em uma gama completa de potências (50 até 1000 W) e ideais para iluminação pública, aeroportos, estacionamentos, auto-estradas, áreas industriais e esportivas e iluminação de destaque (Philips 1996). A lâmpada a vapor de sódio é a fonte de luz mais eficiente disponível no mercado, ou seja, ilumina dez vezes mais que as incandescentes comuns. Sua vida útil é da ordem de 18.000 horas (Osram 1996a).

2.3.3 - Funcionamento de uma lâmpada

As lâmpadas fluorescentes são consideradas lâmpadas de "descarga", porque produzem luz pela passagem de corrente elétrica através de um vapor ou gás (Figura 2.4). A corrente passa através do vapor de mercúrio a baixa pressão (2,5 mm Hg = 333,31 Pa) (Truesdale et al. 1993). Assim, as lâmpadas fluorescentes são chamadas de "lâmpadas de mercúrio de baixa pressão". Quando a lâmpada é ligada, a corrente elétrica aquece os cátodos que estão recobertos com material emissivo especial, fazendo com que emitam elétrons. O fluxo de elétrons entre os eletrodos ioniza os gases de enchimento, isto é, propicia uma carga elétrica nos gases de enchimento e cria um fluxo de corrente entre os cátodos. Esse fluxo de corrente é chamado de arco elétrico, ou descarga elétrica. Os elétrons chocam-se com os átomos de mercúrio, fazendo com que estes emitam raios ultravioleta (UV-C, comprimento de onda de 254 nm). Quando esses raios atingem a camada de fósforo (camada difusora) produz-se luz visível (380 a 780 nm) (Osram 1971, Battye et al. 1994, Loja Elétrica 1999).

O princípio básico de funcionamento de uma lâmpada HID assemelha-se ao da lâmpada fluorescente. Tais lâmpadas também são consideradas fontes de luz do tipo "descarga". Nestas lâmpadas a luz é produzida pelo próprio arco elétrico. A descarga, em forma de arco, processa-se a temperaturas muito mais altas do que nas lâmpadas fluorescentes - daí a denominação "descarga de alta intensidade". Em termos simples, ela funciona da seguinte maneira: quando se

liga a lâmpada, um pequeno arco elétrico forma-se entre o eletrodo de partida e o eletrodo principal mais próximo; o arco elétrico faz com que as partículas do gás de partida e do metal fiquem na forma de íons. Quando o número de íons é suficiente, o arco luminoso definitivo forma-se entre os dois eletrodos principais. Analogamente, como acontece nas lâmpadas fluorescentes, a camada de fósforo na parede interna do bulbo externo transforma a radiação ultravioleta em luz visível (Osram 1971, Nema 1994, Loja Elétrica 1999).

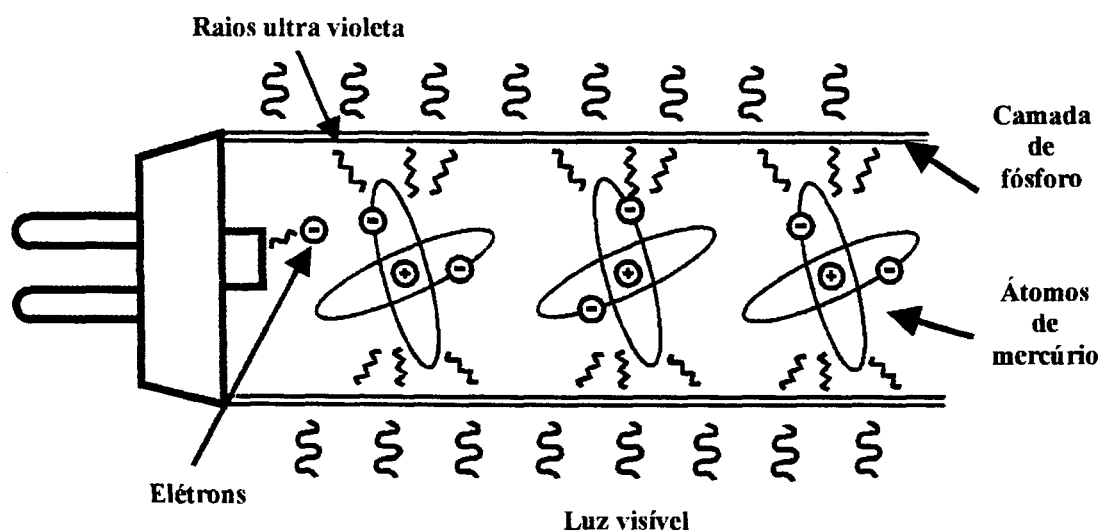


Figura 2.4 – Esquema de funcionamento de uma lâmpada fluorescente (Nema 1994).

2.3.4 - Lâmpadas mais utilizadas sob o ponto de vista comercial

Do ponto de vista comercial, a lâmpada fluorescente mais utilizada é a de 40 W (4 pés de comprimento = 1,22 m; diâmetros $\phi = 1.1/2'' - 38 \text{ mm}$ ou $1.1/4'' - 32 \text{ mm}$), embora outras menores e maiores e de diferentes formas sejam também utilizadas (Raposo e Roeser 2000). No mercado brasileiro existe a seguinte equivalência de cores: LDE - luz do dia especial (Osram), ELD - extra luz do dia (Philips), SLD - super luz do dia (General Electric) e LDP - luz do dia plus (Sylvania) (Osram 1996a). Com referência às lâmpadas de alta pressão, a de vapor de mercúrio é a mais utilizada, na potência de 400 W.

A título de exemplo, os catálogos técnicos da Osram do Brasil (1996a), para lâmpada fluorescente, e Philips (1996), para lâmpada a vapor de mercúrio, apresentam os seguintes dados:

- ◆ lâmpada fluorescente comum, tipo L40LDE de 40 W, fluxo luminoso de 2.700 lm (lm = lúmen, unidade de fluxo luminoso; significa a potência de radiação total emitida por uma fonte de luz e avaliada pelo olho humano) e índice de reprodução de cores de 72

(índice de reprodução de cores - IRC, mede a capacidade da lâmpada em reproduzir cores, numa escala de 0 a 100), temperatura de cor de 5.250 K (mede a cor da luz; quanto mais branca, maior sua temperatura de cor) e vida útil de 7.500 horas. A temperatura, durante o funcionamento da lâmpada, é da ordem de 40 °C;

♦ lâmpada de vapor de mercúrio, tipo HPL-N de 400 W, fluxo luminoso de 22.000 lm, IRC de 40, temperatura de cor de 3.900 K e vida útil de 10.000 horas. A temperatura máxima no bulbo, durante o funcionamento, é da ordem de 350 °C. Comparativamente, uma lâmpada de vapor de sódio SON 400 W, possui: fluxo luminoso de 49.000 lm, IRC de 23, temperatura de cor de 2.000 K, vida útil da ordem de 18.000 horas e temperatura de funcionamento da ordem de 350 °C.

A vida útil de uma lâmpada é função da poeira emissora de elétrons que cobre os cátodos, que é consumida quando a lâmpada é acesa, ou seja, no ato de acender (Truesdale et al. 1993).

2.3.5 - Pesquisa de materiais alternativos e/ou substitutivos para aplicação em lâmpadas de mercúrio

Experimentos conduzidos pela Nema nos EUA mostram que as lâmpadas de descarga podem ser fabricadas utilizando-se outros elementos, diferentes do mercúrio. Alguns desses elementos, como por exemplo, o cádmio, são prejudiciais ao meio ambiente. Todas as pesquisas têm revelado que cada alternativa considerada é, significativamente, menos eficiente que o mercúrio para a produção de luz ultravioleta. Isto significa dizer que uma lâmpada sem mercúrio consumiria mais energia para produzir os mesmos níveis de luz (Usepa 1998a).

Há que se mencionar ainda a atenção especial que as lâmpadas de mercúrio têm recebido, ultimamente, no que diz respeito aos antioxidantes (Haitko et al. 1998). A General Electric norte-americana (Dietrich et al. 1998a, 1998b), por exemplo, vem desenvolvendo modificações que envolvem a incorporação de um agente complexante orgânico (ácido ascórbico - $C_6H_6O_6$; gluconato de sódio - $C_6H_{11}NaO_7$) ou inorgânico e/ou um agente de controle de pH, que reduz a formação de compostos de Fe^{3+} e Cu^{2+} , os quais oxidam mercúrio elementar a formas solúveis em água, e/ou um agente anti-oxidante na estrutura da lâmpada. Esses agentes visam à redução do arraste de mercúrio quando da disposição final deste produto em aterros. A fim de atingir o mesmo objetivo, a GTE Products Corp., empresa norte-americana, desenvolveu uma modificação que envolve a inclusão de um metal (selecionado entre Fe, Cu, Sn, In, Ni, Co e Ti) capaz de

reduzir eletroquimicamente soluções contendo resíduos de lâmpadas de mercúrio tratados com solução ácida aquosa para mercúrio elementar (Fowler e Bonazoli 1993).

2.4 - CONTEÚDO DE MERCÚRIO EM LÂMPADAS DE MERCÚRIO

A quantidade de mercúrio em uma lâmpada de mercúrio varia consideravelmente de acordo com o fabricante, de uma fábrica para outra, do tipo de lâmpada e do seu ano de fabricação.

Dados apresentados pela National Electrical Manufacturers Association (Nema) mostram que o conteúdo de mercúrio em uma lâmpada fluorescente padrão de 40 W, 1,22 m (4 pés) de comprimento, diâmetro de 38 mm (1.1/2 polegadas) (T12) tem diminuído drasticamente (Tabela 2.2). A predição para o ano 2.000 significa um decréscimo no conteúdo de mercúrio de cerca de 26% em relação a 1995 (Nema 1994). A Usepa apresenta uma previsão de que no período de 1997 – 2007 o conteúdo de mercúrio seja de 21 mg (Usepa 1997a). Dados apresentados pela Nema em trabalho conjunto com a Sylvania (fabricante de lâmpadas), indicam que, provavelmente, 0,2% (0,042 mg) do conteúdo total de mercúrio em uma lâmpada fluorescente usada/queimada esteja sob a forma de mercúrio elementar (vapor), e o restante 99,8% (20,958 mg) sob a forma de mercúrio divalente (Usepa 1997a), (Tabela 2.3). Entretanto, a especiação do mercúrio no pó de fósforo é, ainda, um assunto controvertido e complexo (Usepa 1998b).

O mercúrio em lâmpadas HID está concentrado na sua parte interna, mais precisamente no tubo interno (*pellet*), sob a forma de mercúrio elementar, e o seu conteúdo depende da potência (*wattagem*), variando de 16 mg em uma lâmpada de 75 W a 185 mg em uma lâmpada de 1000 W (Nema 1994). Em lâmpadas a vapor de sódio, o mercúrio está sob a forma de amálgama Hg-Na, e o conteúdo varia de 16 mg de mercúrio, para uma lâmpada de 50 W, a 31 mg para uma lâmpada de 1000 W (Truesdale et al. 1993, Nema 1994, Battye et al. 1994). O mercúrio em lâmpadas a multivapores metálicos varia de 20 mg em lâmpadas de 75 W a valores superiores a 250 mg em lâmpadas de 1.000 W (Nema 1994).

Tabela 2.2 – Conteúdo de mercúrio em uma lâmpada tubular de 40 W.

Ano	Conteúdo de Hg (mg)	Ano	Conteúdo de Hg (mg)
1985	48,2	1995	27,0
1990	41,6	2000	20,0

Fonte: Nema 1994.

Tabela 2.3 - Conteúdo e especificação de mercúrio em lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas de 40 W.

Ano	Mercúrio (mg/lâmpada)		
	Elementar	Divalente	Total
Anterior a 1992	0,082	40,918	41
1992 - 1996	0,06	29,94	30
1997 - 2007	0,042	20,958	21

Fonte: Usepa 1997a.

2.5 - LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE DESCARTE DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

2.5.1 - Nos Estados Unidos da América – EUA

Entre os países industrializados, os EUA têm dedicado especial atenção aos resíduos mercuriais. Nesse país, o mercúrio tem recebido mais atenção do que qualquer outra substância. Isto propiciou a existência de regulamentações em diversas áreas de aplicação, o que tem causado um dramático declínio no seu uso. Hoje, o interesse público sobre os efeitos tóxicos causados pelo mercúrio e a preocupação dos órgãos governamentais sobre o risco de contaminação ambiental que este metal pode representar estão se tornando uma ferramenta poderosa, capaz de limitar o seu uso e, inclusive, até de mudar as práticas de fabricação de produtos. A Tabela 2.4 mostra os padrões ambientais norte-americanos para o mercúrio em diversos meios/matrizes (Usepa 2000).

A disposição de resíduos de mercúrio é regida pelos estatutos da Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) - Documento 40 CFR 261 (Lei Federal). A Usepa regula e fiscaliza, por exemplo, o mercúrio em pesticidas e as liberações desse metal no meio ambiente nas matrizes ar, água e solo; a FDA (Food and Drug Administration), em cosméticos e produtos odontológicos, e a Osha (Occupational Safety Health Administration), as exposições no ar e nos locais de trabalho.

As regulamentações são para resíduos específicos e de fonte não-específica, podendo ser aplicadas a qualquer instalação que gere resíduos. Ainda de acordo com a Lei Federal, o resíduo é considerado um resíduo perigoso “característico” se uma amostra representativa, apresentar uma das quatro características: reatividade, corrosividade, inflamabilidade ou toxicidade. A

inflamabilidade, corrosividade e reatividade descrevem propriedades gerais do resíduo, enquanto a característica de toxicidade identifica resíduos com constituintes tóxicos lixiviáveis ao nível de água subterrânea, se gerenciados impropriamente.

Tabela 2.4 - Padrões ambientais para o mercúrio em diversos meios/matrizas, nos EUA.

Meio/Matriz	Padrão de mercúrio
Água potável	2 $\mu\text{g.L}^{-1}$
Peixe	1 $\mu\text{g.g}^{-1}$ ou 1 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (metil mercúrio)
Água subterrânea	2 $\mu\text{g.L}^{-1}$
Água engarrafada	2 $\mu\text{g.L}^{-1}$
Resíduo perigoso	0,2 mg. L ⁻¹ em testes <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i> (TCLP)
Exposição atmosférica	1 mg.m ⁻³ (Osha)

Fonte: Usepa 2000.

Os resíduos “listados” são, especificamente, efluentes ou produtos que aparecem em uma das três listas de resíduo perigoso na RCRA. A identificação de resíduos perigosos é feita por letras: D - para a identificação de contaminante(s) que exibe(m) a característica de toxicidade; F - para resíduos de fontes não-específicas, tais como os solventes usados; K - para resíduos de fontes específicas; P - para resíduos químicos agudamente perigosos, quando descartados e U - para resíduos químicos tóxicos, considerados perigosos quando descartados (Usepa 2000).

A Usepa tem caracterizado, continuamente, os resíduos industriais e promulgado os padrões ambientais antes que os resíduos possam ser liberados para a disposição final ou para o descarte. O mercúrio pode apresentar-se com os seguintes códigos (Usepa 1992, 2000):

- D009 – identifica resíduo que excede a característica de toxicidade; o nível regulatório é de 0,2 mg.L⁻¹;
- F039 – lixiviado (líquido que percola através do resíduo) resultante da disposição de resíduos classificados como perigosos. F039 é listado para múltiplas substâncias e, por si só, pode não ser um indicador de mercúrio em corpos de água;

- K071 – lama de purificação de salmoura no processo de produção de cloro em célula de mercúrio;
- K106 – lodo de tratamento de águas residuárias do processo de células de mercúrio na produção de cloro;
- P065 – fulminato de mercúrio (composto de mercúrio utilizado em explosivos);
- P092 – acetato de fenilmercúrio (composto de mercúrio utilizado em pinturas);
- U151 – identifica o mercúrio como um resíduo tóxico.

Os regulamentos da RCRA descrevem também as exigências específicas para cada um dos códigos. Os resíduos contendo mercúrio, incluindo resíduos aquosos e não-aquosos, estão sujeitos a restrições para a disposição em aterros. A Usepa tem promulgado e procurado, continuamente, demonstrar a melhor tecnologia disponível para tratar cada tipo de resíduo (*Best Demonstrated Available Technology* – BDAT) (Usepa 1992). Para alguns tipos de resíduos, as regulamentações requerem um tratamento específico, como, por exemplo, incineração ou tratamento térmico. Outros casos, somente a concentração máxima de mercúrio é requerida e qualquer método de tratamento pode ser utilizado. As regulamentações também influenciam na disposição dos produtos e nas opções de reciclagem para produtos contendo mercúrio. Os produtos descartados considerados resíduos perigosos estão sujeitos a regras bem definidas no que concerne a armazenagem/estocagem e transporte.

Quanto aos resíduos de lâmpadas de mercúrio, os EUA são os maiores produtores mundiais. A projeção para o descarte de lâmpadas de mercúrio para o ano 2000 é de 802,7 milhões de unidades, das quais 120,4 milhões são recicladas (Nema 2000). Por esta razão, esse país possui hoje uma legislação federal específica muito bem elaborada e discutida, que teve um incremento muito grande a partir do *Green Lights Program* (programa voluntário de conservação de energia), colocado em prática no início da década de 90.

Especificamente, as lâmpadas de mercúrio (fluorescentes e tipo HID) são consideradas resíduos perigosos porque muitas delas contêm quantidades de mercúrio suficientes para não passar nos testes de TCLP (limite regulatório de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$, Documento 40 CFR, Parte 261.24). Entretanto, alguns pequenos geradores de lixo não reconheciam que tais produtos (lâmpadas fluorescentes) pudessem ser classificados como resíduo perigoso e não os gerenciavam/administravam como tal. Adicionalmente, nem todos os geradores desses resíduos

estavam sujeitos às regulamentações de lixo perigoso como, por exemplo, os geradores de pequeno porte dos setores residencial e comercial.

Em julho de 1994, a Usepa publicou uma regra destinada ao gerenciamento e administração de lâmpadas contendo mercúrio (Documento 59 FR 39288). Nessa proposta, foram apresentadas duas opções para mudanças nas regulamentações que governavam o descarte de lâmpadas contendo mercúrio (Usepa 1997a).

A primeira opção foi acrescentar o descarte de tais lâmpadas às regulamentações válidas para o resíduo universal (Documento 40 CFR, Parte 273). Sob essa opção, as lâmpadas reprovadas no teste TCLP estariam sujeitas mais efetivamente às regulamentações de lixo universal (regulamentações aplicáveis, por exemplo, a alguns tipos de baterias, pesticidas e termostatos). Os lugares receptores desses lixos perigosos (aterros sanitários ou recicladoras) estariam sujeitos às regulamentações de lixos perigosos da RCRA.

A segunda opção foi considerar o descarte de lâmpadas contendo mercúrio como isento da regulamentação de lixo perigoso. Para tanto, uma das duas condições deveriam prevalecer (condições mutuamente excludentes):

- a disposição dessas lâmpadas seria efetuada somente em aterros destinados a resíduos sólidos municipais aprovados pela Usepa;
- seu destino seria restrito às instalações de reciclagem, que deveriam ser licenciadas, aprovadas e registradas pelo respectivo Estado norte-americano.

A regulamentação final para esses tipos de resíduos veio no final de 1999 e entrou em vigência a partir de 6 de janeiro de 2000 – Docket F-99-FLEF-FFFFF/ 40 CFR, Partes 260, 261, 264, 265, 268, 270 e 273 (Usepa 1999). O regulamento final acrescenta as lâmpadas de mercúrio à lista federal de resíduos universais regulados pela RCRA. A Usepa concluiu que tratar as lâmpadas usadas como um resíduo universal levará a que tais lâmpadas tenham melhor gerenciamento, inclusive para os geradores de pequeno porte (quantidades excepcionadas condicionalmente), e a que haja maior aquiescência às exigências de resíduo perigoso no que concerne ao manuseio, carregamento, tempo de estocagem, transporte, tratamento, disposição final e, por fim, à importação e exportação de lâmpadas.

Há de se destacar ainda a importância que a reciclagem (método para de-mercurização de resíduos de lâmpadas) ocupa nos EUA. Dois fatos básicos contribuem para que essa atividade

esteja em franca ascensão: elevado volume de resíduo gerado anualmente e existência de uma legislação ambiental, que foi amplamente discutida por toda a sociedade (fabricantes, pesquisadores, recicladores, geradores de resíduos etc.). Existem em operação dezenas de recicladoras para tratamento dos resíduos de lâmpadas, as quais foram incentivadas a desenvolver tecnologias a partir do *Green Lights Program* de conservação de energia (substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes). O ônus pela reciclagem é suportado pelos geradores de resíduos (poluidor pagador). Excluem-se desta categoria os pequenos geradores dos setores residencial e comercial (Association of Lighting and Mercury Recyclers 2000).

2.5.2 - Na Europa

Na Europa, o movimento ecológico para a preservação do meio ambiente deu origem a uma série de regulamentações no âmbito da ISO Série 14.000 (rotulagem ambiental e selo verde). O Comitê Técnico 207, Subcomitê SC5, a cargo do Reino Unido, é responsável pelos critérios para análise “do berço ao túmulo” de bulbos de lâmpadas.

Quanto aos resíduos de lâmpadas de mercúrio, a situação pode ser visualizada na Tabela 2.5 (Mercury Recovery Technology AB 1999). Em todos os países listados existe uma conscientização ambiental muito clara e bem difundida a respeito dos impactos causados pelo descarte indiscriminado de lâmpadas de mercúrio, com legislação ambiental própria (exceto a Grécia), inclusive com legislação sobre manuseio de mercúrio na maioria dos países. A reciclagem dos resíduos de lâmpadas de mercúrio é uma atividade em operação ou em vias de operação em 63% dos países relacionados, com taxas que podem alcançar 50% em países como a Alemanha, Áustria, Bélgica e Suécia, 80% na Holanda e 90% na Suíça. Na Espanha, Finlândia e Suíça a responsabilidade pela reciclagem é do gerador (poluidor pagador). Nos demais países, o ônus pela reciclagem, ao contrário do que acontece nos EUA não recai sobre o gerador do resíduo, mas sim sobre o fabricante. A cada lâmpada nova vendida, o fabricante é obrigado a receber uma de volta. A coleta e o transporte de lâmpadas usadas intactas são feitos através da distribuição reversa, situação em que o usuário devolve a lâmpada usada no local onde ela foi comprada, o vendedor a devolve ao distribuidor e assim por diante, até chegar ao fabricante (início da cadeia de distribuição do produto). A idéia da distribuição reversa funciona muito bem em país com consciência ambiental já consolidada, distâncias de transporte relativamente reduzidas e simplicidade no sistema de distribuição. A experiência com a distribuição reversa nos EUA não deu certo, em decorrência do complexo sistema de distribuição (Nema 1994).

Tabela 2.5 – Legislação ambiental e reciclagem de resíduos de lâmpadas de mercúrio em países da Europa.

País	Consciência ambiental	Legislação		Reciclagem	Responsabilidade por conta do fabricante poluidor
		Ambiental	Manuseio		
Alemanha	X	X	X	X	X
Áustria	X	X	(X)	(X)	(X)
Bélgica	X	X	X	X	X
Bulgária	X	X			
Dinamarca	X	X	X	(X)	X
Espanha	X	X	X	X	Poluidor-pagador
Finlândia	X	X	(X)	X	Poluidor-pagador
França	X	X	X		(X)
Grécia	X				
Holanda	X	X	X	X	X
Hungria	X	X	X	X	(X)
Irlanda	X	X	(X)		(X)
Itália	X	X	X	X	(X)
Lituânia	X	X	X		X
Noruega	X	X	X	X	X
Polónia	X	X		(X)	
Portugal	X	X	X		X
República Checa	X	X	X	X	X
Romênia	X	X	X		(X)
Reino Unido	X	X	(X)		(X)
Suécia	X	X	X	X	(X)
Suíça	X	X	X	X	Poluidor-pagador

(X) – Em estudo ou em implantação/implementação;
 Fonte: MRT 1999.

2.5.3 - No Brasil

No Brasil, praticamente todo resíduo de lâmpada é jogado diretamente no lixo. Somente uma pequena parcela desse volume é tratada pela atividade de reciclagem. Esta é uma atividade voluntária, que alcança apenas 3% do volume descartado e tem seu ônus suportado pelo gerador do resíduo, ou seja, poluidor pagador (Raposo e Roeser 2001). A legislação brasileira para resíduos de mercúrio está contida, genericamente, na matéria sobre resíduos sólidos, que por sua

vez está centrada na Norma NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (Abnt 1987a). Esta norma assemelha-se bastante à norma norte-americana da RCRA (Usepa 2000).

Conforme a norma brasileira supracitada, o mercúrio, por sua capacidade de bioacumulação em ecossistemas e por seu potencial de migrar do resíduo para o ambiente, é classificado como Resíduo Classe I – Perigoso. É uma substância tóxica, Anexo F – Listagem nº 6, código de substância U 151, e um poluente, código D 011, com limite máximo no extrato de 0,1 mg.L⁻¹, em testes de lixiviação, conforme valores de referência da *World Health Organization* (WHO) e complementados com a Portaria nº 56 de 14/03/77, do Ministério da Saúde – Padrão Brasileiro de Potabilidade da Água.

Ainda segundo essa Norma, no Anexo I, Listagem nº 9 (massa bruta), o mercúrio ou seus compostos não devem exceder o limite máximo no resíduo total em 100 mg de Hg.kg⁻¹. Se este poluente estiver acima do limite máximo, o resíduo deve ser disposto em instalações adequadas.

Com referência aos resíduos de lâmpadas de mercúrio, as legislações existentes são:

2.5.3.1 - Legislação do Estado da Bahia

Projeto de Lei nº 11305/97, do Deputado Estadual Arnaldo Alves Teixeira, ainda em fase de tramitação nas comissões de Constituição e Justiça, Proteção ao Meio Ambiente e Saúde e Saneamento, dispõe sobre o descarte de lâmpadas fluorescentes, baterias de telefones celulares e relógios, nos seguintes termos (Alba 1997):

“Art. 1º – Fica proibido, no Estado da Bahia, jogar no lixo doméstico ou comercial produtos químicos venenosos, nocivos à saúde e ao meio ambiente, tais como mercúrio, níquel, cádmio e todos os demais, contidos, principalmente, em lâmpadas fluorescentes, baterias de telefones celulares, relógios e máquinas.

Art. 2º – Os fabricantes e seus representantes no Estado da Bahia ficam obrigados a adotar todos os mecanismos necessários e adequados à destinação desses produtos, inclusive a ampla divulgação do local apropriado para colocá-los após o uso.”

2.5.3.2 - Legislação no Estado de Minas Gerais

Projeto de Lei nº 6, de 1º de fevereiro de 1999, de autoria do Deputado Newton de Moraes, dispõe sobre a política estadual de recolhimento de lâmpadas fluorescentes usadas, nos seguintes termos (ALMG 1999):

“Art. 1º – O Estado de Minas Gerais adotará uma política de recolhimento de lâmpadas fluorescentes usadas, com o objetivo de proteger o meio ambiente.

Art. 2º – A política estadual de recolhimento de lâmpadas fluorescentes usadas será implementada por meio de medidas pedagógicas.

Art. 3º – O Estado poderá celebrar convênios com empresas privadas objetivando o custeio das medidas pedagógicas previstas no artigo anterior, bem como com municípios interessados em implementar um sistema de coleta de lâmpadas fluorescentes usadas.”

O Projeto de Lei nº 6/99 foi examinado em conjunto com o Projeto de Lei nº 4/99 (autoria do Deputado Sávio Souza Cruz, o qual dispõe que a política estadual de coleta seletiva de lixo será implementada por meio de medidas pedagógicas) pela Comissão de Meio Ambiente e Recursos Naturais da Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais, em 19 de maio de 1999. No parecer final apresentado por essa Comissão, os pressupostos para a implantação e implementação do sistema de coleta seletiva de lixo estavam satisfatoriamente atendidos com direcionamento para a ação educativa, envolvendo mudança de hábitos das pessoas na sua relação com a coletividade e com a municipalidade. A Comissão opinou pela aprovação conjunta dos dois Projetos de Lei, na forma do Substitutivo nº 1, com a Emenda nº 1, cuja redação passou a ser a seguinte:

“Art. ... – Compete ao Conselho Estadual de Meio Ambiente (Copam), no prazo de cento e oitenta dias a partir da publicação desta lei, baixar normas e estabelecer mecanismos para o recolhimento, reaproveitamento, disposição final, reciclagem ou outras formas de processamento de lâmpadas fluorescentes, pilhas e baterias usadas, tendo como diretriz básica o princípio de que a responsabilidade pelo destino final desses materiais e rejeitos é de quem os produz.”

2.5.3.3 - Legislação no Estado do Rio Grande do Sul

Lei nº 11.187/98, de 07/07/1998, altera a Lei nº 11.019, de 23/09/1997, acrescentando normas sobre o descarte e destinação final de lâmpadas fluorescentes, baterias de telefone celular e demais artefatos que contenham metais pesados, assim dispondo (ALRS 1997):

“Art. 1º – É vedado o descarte de pilhas que contenham mercúrio metálico, lâmpadas fluorescentes, baterias de telefone celular e demais artefatos que contenham metais pesados em lixo doméstico ou comercial.

§ 1º – Estes produtos descartados deverão ser separados e acondicionados em recipientes adequados para destinação específica, ficando proibida a disposição em depósitos públicos de resíduos sólidos e a sua incineração.

§ 2º – Os produtos descartados deverão ser mantidos intactos como forma de evitar o vazamento de substâncias tóxicas, até a sua desativação ou reciclagem.

§ 3º – O Estado orientará os municípios em relação à escolha de locais e recipientes apropriados para a coleta destes produtos.

Art. 2º – Os fabricantes dos produtos de que trata o artigo anterior e/ou seus representantes comerciais deverão registrá-los no órgão ambiental do Estado.”

2.5.3.4 - Legislação na Cidade de São Paulo

Lei Municipal da Cidade de São Paulo nº 12.653, promulgada em maio de 1998, estabelece que (Lex 1998):

“Art. 1º – Fica proibido o descarte como lixo comum de lâmpadas fluorescentes.

Art. 2º – Fica o Poder Público Municipal proibido de recolher lâmpadas fluorescentes descartadas como lixo comum.

Art. 3º – Fica o Poder Executivo obrigado a criar um serviço voltado à coleta do lixo especial constituído por lâmpadas fluorescentes descartadas. O lixo recolhido nos termos do *caput* deste artigo deverá ser, quanto possível, destinado à reciclagem, nos termos mais vantajosos para o Poder Público Municipal, ou depositado em local próprio adequado para lixo tóxico.

Art. 4º – Fica o Poder Público obrigado a executar campanha de esclarecimento da população sobre o perigo para a saúde pública do mercúrio usado nas lâmpadas fluorescentes quando inadequadamente utilizadas e sobre o caráter tóxico dessas mesmas lâmpadas quando descartadas como lixo.”

2.6 - TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

Para o tratamento dos resíduos de lâmpadas de mercúrio, a Usepa (Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana) tem identificado os processos térmico, lixiviação ácida, estabilização e incineração como BDAT¹ (Usepa 1998c), ou seja, tecnologias mais efetivas disponíveis comercialmente.

Os dois primeiros processos merecem atenção especial, pois permitem a recuperação do mercúrio através de uma série de atividades denominadas reciclagem² (National Recycling Coalition 1995). A reciclagem minimiza o volume de mercúrio lançado ao meio ambiente e recupera alguns materiais constituintes das lâmpadas. As opções de aterramento e incinerações em determinadas situações chegam a ser proibidas quando o limite regulatório de mercúrio no resíduo é excedido.

¹ **Best Demonstrated Available Technology (BDAT)** - É a tecnologia mais efetiva disponível comercialmente para tratar resíduos perigosos. As tecnologias identificadas como tal podem mudar com os avanços tecnológicos.

² **Reciclagem** – É definida como sendo uma série de atividades pelas quais o material descartado é coletado, separado, processado e convertido em subprodutos (matérias primas) e utilizados na produção de novos produtos. Os subprodutos obtidos na reciclagem de lâmpadas podem ser reutilizados na manufatura de novas lâmpadas.

2.6.1 - Processo de reciclagem

Um processo de reciclagem de lâmpadas deve incluir desde um competente serviço de esclarecimento junto aos geradores de resíduos como, por exemplo, de que as lâmpadas devem ser transportadas de modo que não ocorra a quebra dos bulbos durante o seu transporte, até a garantia final de que o mercúrio será removido dos componentes recicláveis. Analisadores portáteis devem monitorar a concentração de vapor de mercúrio do ambiente para assegurar uma operação segura dentro dos limites de exposição ocupacional ($50 \mu\text{g.m}^{-3}$, de acordo com a Osha).

O processo de reciclagem mais utilizado sob o ponto de vista comercial, em diversos países, envolve duas fases distintas: uma fase preparatória, para esmagamento e redução do tamanho da lâmpada, e uma fase subsequente, para a recuperação do mercúrio contido no resíduo (Cogar 1992, Apliquim 1992, Ecolights Northwest 1998, Mercury Recovery Technology AB 1998, Apliquim 1999):

2.6.1.1 - Fase preparatória (Processo físico)

As lâmpadas são introduzidas em processadores especiais para esmagamento e quebramento (processo físico), quando então os materiais constituintes são separados em 4 (quatro) classes distintas: terminais de alumínio/componentes ferro-metálicos, vidro, pó de fósforo rico em mercúrio e isolamento baquelítico.

No início do processo, as lâmpadas são implodidas e quebradas em pequenos fragmentos. Isto permite separar a poeira de fósforo contendo mercúrio dos outros elementos constituintes. As partículas esmagadas restantes são, posteriormente, conduzidas a um ciclone por um sistema de exaustão, onde as partículas maiores, tais como vidro quebrado, terminais de alumínio e pinos de latão são ejetados para fora sendo, então, separados por separadores gravimétrico e eletromagnético.

O pó de fósforo e particulados são coletados em um filtro colocado após o ciclone. Posteriormente, por um mecanismo de pulso reverso, a poeira é retirada desse filtro e transferida para uma unidade de destilação para recuperação do mercúrio (2ª fase do processo). O mercúrio recuperado pode ser assim reutilizado, bem como o pó de fósforo (tintas e pinturas).

O vidro, em pedaços de 15 mm, é então limpo, testado e enviado para reciclagem. O vidro, nesta circunstância, pode ser reciclado e reutilizado em aplicação não-alimentar. O alumínio e pinos de latão, depois de limpos, podem ser enviados para reciclagem em uma

fundidora. Levando-se em consideração a Norma Brasileira de Resíduos Sólidos NBR 10.004 (ABNT 1987a), a concentração média de mercúrio nesses materiais não deve exceder ao limite de 100 mg por kg de resíduo. O único componente da lâmpada que não é reciclado é o isolamento baquelítico existente nas extremidades da lâmpada.

Uma das tecnologias disponíveis de maior avanço tecnológico é apresentada pela empresa Mercury Recovery Technology AB (MRT), estabelecida em Karlskrona, Suécia. O processador da MRT trabalha a seco, em sistema fechado, incorporado a um container de 20 pés de comprimento (6,10 m), no qual o ar é trazido ao sistema sob pressão negativa para evitar a fuga de mercúrio para o ambiente externo (emissões fugitivas). Existe também um processador especial para lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio e multivapores), o que separa o *pellet* de vidro contendo mercúrio dos demais constituintes (MRT 1998).

2.6.1.2 - Fase subsequente (Recuperação do mercúrio contido no resíduo)

A fase subsequente neste processo de reciclagem é a recuperação do mercúrio contido na poeira de fósforo. A recuperação pode ser feita por processo térmico ou químico.

No processo térmico, o material é aquecido a fim de vaporizar o mercúrio até, aproximadamente, 550 °C, passando pelo seu ponto de ebulição (357 °C – mercúrio metálico). O material vaporizado a partir desse processo é condensado e coletado em coletores especiais ou decantadores. O mercúrio assim obtido pode requerer tratamento adicional, tal como borbulhamento em ácido nítrico para remover impurezas. Emissões fugitivas durante esse processo podem ser evitadas usando-se um sistema de operação sob pressão negativa. Para se conseguir uma pureza de mercúrio da ordem de 99,99%, as partículas orgânicas carregadas pelos gases são conduzidas a uma câmara de combustão onde, então, são oxidadas. Na Figura 2.5 é mostrado o ciclo de operações envolvidas nas fases de esmagamento e tratamento térmico (Ecolights Northwest 1998).

No processo químico, as lâmpadas passam por quebradores especiais e, em seguida, os fragmentos são peneirados e submetidos a uma lavagem para separação dos diversos componentes. A água residual de lavagem é então tratada em operações subsequentes, que compreendem: (a) centrifugação; (b) decantação; (c) tratamento químico com sulfito de sódio - Na_2SO_3 ou bissulfito de sódio - NaHSO_3 ou material equivalente (o mercúrio é oxidado para

produzir sulfeto de mercúrio, um sólido insolúvel em água); (d) filtração e (e) troca iônica. Deste processo resultam hidróxidos e sais, que são separados posteriormente (Cogar 1992).

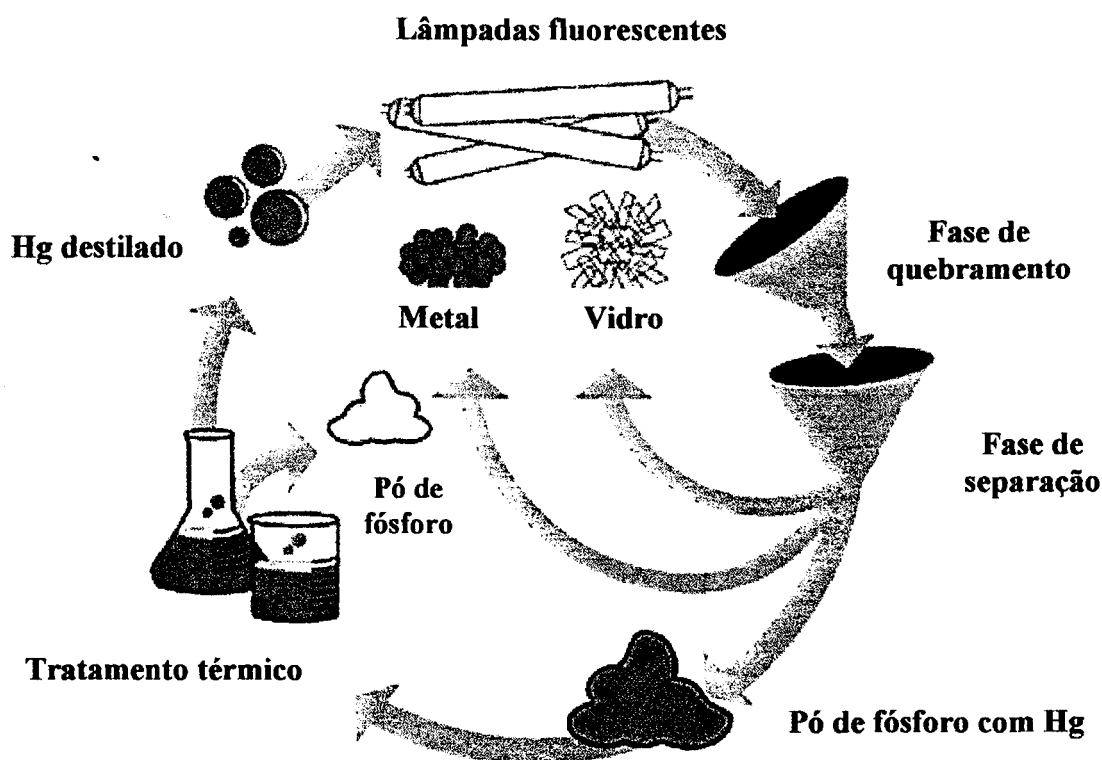


Figura 2.5 – Ciclo das operações envolvidas nas fases de separação e tratamento térmico.

A Apliquim Equipamentos e Produtos Químicos Ltda., sediada em São Paulo, descreve, em seu pedido de patente no INPI (Apliquim 1992), o seguinte processo para tratamento de lâmpadas fluorescentes:

“Processo compreendendo, inicialmente uma operação de corte das referidas lâmpadas, obtendo-se: uma porção central, definida pelos tubos das lâmpadas, incluindo: uma fração de vidro alcalino, e uma fração fluorescente, definida pelo revestimento de tubo, incluindo mercúrio e uma parcela de metais pesados; uma porção de pontas, definida pelas extremidades das lâmpadas, incluindo uma fração de vidro plúmbeo; uma fração de remanescentes da fração fluorescente; uma fração metálica, incluindo uma parte ferrosa e uma parte não-ferrosa e uma porção gasosa, compreendendo poeiras da dita fração fluorescente. A porção gasosa é submetida a um processo de lavagem, a solução obtida sendo transferida para tratamentos químico e físico. A porção de pontas é submetida a operações de cominuição, separações magnéticas e de sólidos, obtendo-se, seqüencialmente, ferro, alumínio, vidro plúmbeo com contaminante de fração

fluorescente, este último sendo submetido posteriormente a tratamento semelhante ao efetuado sobre a porção central. O ferro e o alumínio podem ser dispostos ou reciclados, no primeiro caso sem prejuízos ao meio ambiente. Dos ditos tratamentos químico e físico resultam hidróxidos e/ou sais que são separados, e água, inerte, despejável sem prejuízos ao meio ambiente”. Embora não esteja claro na descrição acima, o pó de fósforo é submetido à retortagem (processamento térmico) para recuperação do mercúrio contido.

A empresa Mega Reciclagem, sediada em Curitiba (PR), adota processo de reciclagem envolvendo tratamento químico. Esta empresa desenvolveu, em parceria com o Cefet-PR, um equipamento capaz de destruir as lâmpadas e separar seus subprodutos, seguindo a descontaminação desse material e a recuperação total do mercúrio, em ciclo fechado e contínuo de água + reagentes, e processo de separação de metais em sistema de decantação. A empresa faz prestação de serviços de descontaminação de lâmpadas inservíveis, sendo emitido ao final do processo um Laudo de Descontaminação do lote enviado. A Mega Reciclagem possui jurisdição do Instituto Ambiental do Paraná, tendo sido licenciada por esse órgão por meio da Licença Operacional n.º 02688 de 26/01/2000. Todos os subprodutos das lâmpadas ficam em propriedade da Mega Reciclagem, que se responsabiliza pela sua comercialização e disposição final (Mega Reciclagem 2000).

Recentemente, a Naturalis do Brasil – Desenvolvimento de Negócios (2001), sediada em Jundiaí (SP) está introduzindo no mercado brasileiro um equipamento do tipo *drum top crusher*, denominado *bulb eater*, modelo 55 VRS (vapor removal system), fabricado pela empresa norte-americana Air Cycle Corporation (2001) destinado à quebra (micro-fragmentação) de lâmpadas fluorescentes (T8 e T12). Esse equipamento é dotado de: (a) um filtro de carvão ativado, que captura e neutraliza todo o vapor de mercúrio liberado durante o processo e (b) um filtro tipo Hepa, para coleta do material particulado. Para a descontaminação final, o material processado deve ser enviado a uma recicladora para a recuperação do mercúrio contido no resíduo.

Há de se comentar que a tecnologia *bulb eater* pode apresentar sérios problemas com emissões de mercúrio, além do que os tambores contendo os resíduos micro-fragmentados de lâmpadas devem ser selados para evitar problemas com umidade. Regulamentações em diversos países da Europa têm impedido o funcionamento dos processadores que utilizam essa tecnologia (MRT 1999).

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi realizada utilizando-se as seguintes bases de dados:

- *Chemical Abstracts Database American Chemical Society;*
- *Analytical Abstracts Database The Royal Society of Chemistry;*
- *International Nuclear Information System (INIS) International Atomic Energy Agency (IAEA);*
- *Current Contents Institute for Scientific Information (ISI);*
- *Web of Science ISI (através da parceria Fapesp/Capes);*
- *Usepa (através dos escritórios de resíduos sólidos da United States Environmental Protection Agency);*
- *Bases diversas de informação tecnológica disponível na Internet.*

3.2 - PESQUISA DE PATENTES

O levantamento do estado da arte sobre tecnologias para de-mercurização de lâmpadas de mercúrio foi realizado através de pesquisa bibliográfica (ênfase no processo de reciclagem), pesquisa de patentes e contatos com fabricantes de equipamentos. Este procedimento permitiu a formação de um quadro mais concreto sobre as conexões existentes entre os processos e as tecnologias colocadas em prática no mercado mundial.

A pesquisa de tecnologias (nacionais e internacionais) referentes à reciclagem de lâmpadas foi efetuada através de trabalho de busca na *Internet (World Wide Web)*, em *sites* especializados, que disponibilizam informações sobre patentes. Para tanto, foram utilizadas palavras chaves como, por exemplo: reciclagem, lâmpadas, mercúrio, resíduos. Nos sites estrangeiros foram utilizadas as palavras correspondentes em inglês.

Neste trabalho, a busca ficou restrita às bases disponibilizadas nos bancos de patentes do Brasil (INPI), EUA (USPTO), Europa (Espace/EP-A) e Canadá, através dos seguintes *sites*:

- <http://www.inpi.gov.br> - para pedidos de patentes depositados no Brasil, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), a partir de agosto de 1992;
- <http://www.uspto.gov> - para patentes registradas nos EUA pelo *US Patent & Trademark Office* (USPTO), a partir de janeiro de 1976;
- <http://ep.espacenet.com> - para patentes registradas no *European Patent Office* (EPO), *World Intellectual Property Organization* (WO) e no *Japanese Patent Office*, a partir de 1978;
- <http://patent.ic.gc.ca> - para patentes registradas no Canadá, concedidos pelo *Canadian Intellectual Property Office* (Cipo), a partir de outubro de 1989.

Os documentos de patentes consultados são originários dos principais países industrializados como, por exemplo, Estados Unidos da América, Canadá, Alemanha, Suécia, Japão, Austrália, organizações internacionais, Escritório Europeu de Patentes, Organização Mundial da Propriedade Intelectual (documentos do *Patent Cooperation Treaty*), além do Brasil. Esses documentos possuem uma descrição técnica detalhada e uma estrutura uniforme, que permitem a qualquer interessado, familiarizado com o assunto, obter de forma eficaz a informação desejada. A maior parte dos documentos de patentes nos sites mencionados encontra-se devidamente organizada de acordo com a Classificação Internacional de Patentes (CIP), um sistema de classificação de documentação próprio e de uso internacional, que permite a rápida pesquisa, por área tecnológica.

A base de dados existentes nos *sites* supra-relacionados possibilitou o levantamento e a análise de informações relevantes sobre a magnitude e dinâmica de tecnologias patenteadas como, por exemplo:

- levantamento das tecnologias existentes no nível mundial: por empresa; por inventor e/ou requerente; por assunto e por tecnologias patenteadas;
- levantamento da capacitação tecnológica;
- mapeamento das citações em documentos de patentes, o que permitiu o rastreamento da tecnologia em determinado segmento, identificando o conjunto de técnicas que caracterizam uma tecnologia.

3.3 - ESTUDO PROSPECTIVO SOBRE DESCARTE DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

A fim de alcançar os objetivos propostos à investigação, e na ausência de dados estatísticos e de estudos mais aprofundados sobre o assunto em tela, o recurso utilizado foi desenvolver uma pesquisa quantitativa que pudesse gerar dados, sem a intervenção do entrevistador/pesquisador. Dessa maneira, conseguir-se-ia um instantâneo das práticas e atitudes gerenciais de certo setor gerador de descarte em um determinado tempo. A metodologia escolhida que melhor se adaptou aos propósitos foi a pesquisa de *survey*, muito difundida e amplamente utilizada no campo das Ciências Sociais, e Pesquisa de Marketing (Babbie 1999). Ela permite, de maneira mais convincente, a identificação de parâmetros importantes a respeito da contaminação ambiental provocada pelo descarte inadequado de lâmpadas de mercúrio.

Para a pesquisa de *survey* foram feitas considerações preliminares a partir de estudo exploratório de dados secundários (*desk research*), que se constitui em peça fundamental para o seu direcionamento. Essas considerações são:

■ Contexto geral do Estado de Minas Gerais

O Estado de Minas Gerais está situado na região sudeste do Brasil, onde se concentra 40,9% da população e mais de 60% da produção industrial do país. Minas Gerais é o segundo estado brasileiro em população (16.672.613 habitantes) e uma das unidades mais ricas da Federação. Seu Índice de Potencial de Consumo (IPC)³ é de 8,507, terceiro melhor do país (Gazeta Mercantil 1998). Ao redor de Belo Horizonte, capital do Estado, estabelece-se a região metropolitana homônima, com 4.330.680 habitantes, conforme dados do Censo 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2001).

■ Produção brasileira de lâmpadas de mercúrio

Em 1998, a produção brasileira de lâmpadas de mercúrio foi da ordem de 48,5 milhões de unidades/ano (Abilux 1998). Esta estatística serviu de referência para diversas citações e estimativas realizadas neste trabalho, muito embora os números atuais tenham sofrido alterações importantes. Com efeito, em 1º de agosto de 2001, conforme Palestra proferida na sede do Conama – Brasília, a Abilux apresentou uma nova estatística referente ao ano 2000 mostrando que o volume de lâmpadas comercializado no Brasil tinha alcançado 80 milhões de unidades

³ Índice de Potencial de Consumo (IPC) define, em porcentagem, o poder de compra de cada Estado ou Município em relação à União ou Estado, respectivamente.

(crescimento de 65% em dois anos): 14 milhões de lâmpadas fluorescentes compactas, 56 milhões de lâmpadas fluorescentes tubulares e 10 milhões de descarga de alta intensidade (Abilux 2001). A quantidade de mercúrio utilizada na fabricação, que em 1998 era de 1.000 kg (média de 20,6 mg de Hg/lâmpada) passou, em 2000, para 1.096 kg (média de 13,7 mg/lâmpada), o que representou uma queda significativa (33,5%) no conteúdo médio/lâmpada fabricada. Do total comercializado, 78% são de fornecedores associados à Abilux e 22% de importadores independentes. Já a partir de 2001, esses números poderão sofrer modificações sensíveis em virtude do plano de contingência de energia elétrica posto em prática pelo Governo Federal (mês de maio), o que motivou a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas mais eficientes, principalmente no setor residencial. As notícias veiculadas na mídia dão conta de que poderia haver um consumo extra de pelo menos 50% só no consumo de lâmpadas compactas.

■ Estimativa de descarte

Para cada lâmpada produzida há uma descartada (relação produção/descarte = 1). Assim, estima-se que o descarte de lâmpadas referente ao ano de 1998 tenha sido da ordem de 48,5 milhões de unidades/ano (Abilux 1998).

■ Principais pólos e setores de geração de descarte de lâmpadas

Em diversas partes do mundo, os principais pólos de descarte de lâmpadas de mercúrio estão associados às regiões das grandes metrópoles e centros industriais adjacentes. No Brasil, esses pólos estão associados às metrópoles da Região Sudeste (São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte). Estudos realizados nos EUA mostram que os setores industrial, comercial e público dominam amplamente o uso de lâmpadas de mercúrio (Nema 1994). Por analogia e para maior abrangência, a pesquisa de *survey* considerou, também, o setor hospitalar. O setor residencial não foi objeto dessa pesquisa, pois envolve, sabidamente, geradores de pequeno porte e muito difíceis de serem consultados.

■ Tipos de lâmpadas de mercúrio

Para efeito de levantamento dos quantitativos de descarte, a pesquisa considerou, dentro da diversidade de tamanhos e formas de lâmpadas, somente dois tipos: (a) lâmpada fluorescente (LF) de 40 W de potência, 1,22m de comprimento e diâmetro de 1.1/2” como representante de todas as lâmpadas fluorescentes e fluorescentes compactas e (b) lâmpada a vapor de mercúrio de 400 W de potência, como representante das lâmpadas de vapor de alta intensidade (tipo HID).

3.4 - MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

Foram utilizadas lâmpadas novas e descartadas (usadas/queimadas) dos seguintes tipos: (i) fluorescentes tubulares de 20 e 40 W e (ii) vapor de mercúrio de 400 W. Esta seleção levou em consideração os tipos de lâmpadas de mercúrio de maior consumo no mercado brasileiro e que, conseqüentemente, oferecem maior potencial de risco à contaminação ambiental.

As lâmpadas selecionadas foram, inicialmente, limpas, implodidas em laboratório climatizado e apropriado para exaustão dos gases (capela) e, em seguida, seus constituintes selecionados manualmente, com auxílio de pincel, espátula, pinça, alicate de pontas e cortador de vidro com ponta diamantada. As amostras para a determinação de chumbo e do cádmio contidos, respectivamente, no bulbo externo de lâmpadas tipo HID e em lâmpadas fluorescentes foram reduzidas a uma granulometria aproximada de 200 mesh (74 μm), com a ajuda de um pulverizador, objetivando facilitar a filtração nos testes de lixiviação e a abertura química. No caso das amostras para a determinação do mercúrio contido no pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes, procurou-se evitar a utilização de utensílios/aparatos que pudessem favorecer a formação de amálgamas de mercúrio. Durante a coleta do pó de fósforo (raspagem com espátula) foi dada atenção especial, para evitar a inclusão de cacos de vidro e de outros constituintes, que poderiam alterar o cálculo da concentração de mercúrio e cádmio.

Foram utilizados métodos analíticos qualitativos e quantitativos disponíveis na infraestrutura laboratorial do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear - CDTN/CNEN e do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (análise de termodesorção de mercúrio).

3.4.1 – Técnicas e métodos instrumentais para caracterização dos principais constituintes de lâmpadas de mercúrio

3.4.1.1 - Difração de Raios-X (DRX)

A difração de Raios-X (método do pó) foi utilizada para identificação de fases minerais. Nesse método, o material a ser analisado deve ser reduzido a um pó, com tamanho mínimo e máximo de partículas de 2 μm e 20 μm , respectivamente. É importante que a amostra não seja muito pulverizada, pois a redução excessiva da granulometria pode diminuir sua cristalinidade.

Além do tamanho de partículas, a amostra nesse método necessita de outros pré-requisitos, tais como: orientação aleatória e número mínimo de cristalitos, para que todas as famílias de planos cristalográficos se manifestem e, por último, a amostra deve ser homogênea, para que não ocorra distorção na intensidade dos picos.

As amostras analíticas (aliquota de 40 mg) foram preparadas utilizando-se porta-amostras de vidro e álcool como líquido aglomerante. O equipamento utilizado foi um difratômetro de Raios X, de fabricação Rigaku, modelo Geigerflex, semi-automático, com goniômetro horizontal, monocromador de cristal curvo de grafite e tubo de cobre. As análises foram feitas de acordo com os Manuais da *Joint Committee on Powder Diffraction Standards e International Centre for Diffraction Data* (1998).

3.4.1.2 - Espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX)

O princípio básico dessa técnica consiste na dispersão da radiação X por difração em um cristal analisador. A fonte de Raios-X é um tubo, geralmente de ródio, com uma janela por onde sai o feixe que incide sobre a amostra. Os raios emitidos pela amostra são colimados e incidem em um ou mais cristais, que apresentam valores de d (espaçamento interplanar) bem conhecidos. Os cristais giram fazendo com que os feixes difratados se espalhem, obtendo-se um espectro de varredura. Através da equação de Bragg ($n\lambda = 2d\sin\theta$), calcula-se o valor de λ (comprimento de onda). Este valor é característico de cada elemento químico e é refletido nos picos do espectro de FRX, sendo então possível identificá-los.

As amostras de pó de fósforo (1 g) foram prensadas com ácido bórico – $H_6B_2O_6$ (7 g), utilizando-se uma prensa da marca Herzog com pressão uniaxial de 5 t, durante 5 segundos. O equipamento utilizado para as análises foi um espectrômetro de fluorescência de Raios X, de fabricação Rigaku, modelo 3134 – tubo de cromo, semi-automático. Foram investigados os elementos químicos compreendidos na faixa espectral que vai do magnésio ($Z=12$) até o urânio ($Z=92$), excetuando-se, obviamente, os gases nobres.

3.4.1.3 - Espectrometria de energia de Raios X por excitação de raios gama (Kevex)

No sistema Kevex, os raios gama provenientes de uma fonte radioativa de Amerício 241, com $3,7 \times 10^9$ Bq de atividade, atingem a amostra a ser analisada e interagem com seus átomos provocando excitação e emissão de fótons de Raios-X. O sistema possui um detetor de estado sólido, que converte a energia de Raios-X em pulsos elétricos com amplitude diretamente

proporcional à energia do fóton capturado. É então gerado um espectro de picos das energias dos fótons dos diversos elementos presentes na amostra. Determina-se a intensidade das linhas de Raios-X características para se calcular as concentrações elementares.

As análises por espectrometria de energia de Raios X foram utilizadas para pesquisar os elementos químicos presentes no pó de fósforo (elementos a partir do titânio $Z=22$). Depois de pulverizadas a aproximadamente 200# (mesh), as amostras (massa de 200 mg) foram colocadas em porta-amostras de vidro e submetidas a ligeira pressão manual. O equipamento utilizado para análise foi um espectrômetro Sigma X9050 – Kevex.

3.4.1.4 - K_0 -ativação neutrônica paramétrica

A técnica de k_0 -ativação neutrônica paramétrica foi aplicada na determinação de Hg e Sb em amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes (aliquota de 1 g). É uma técnica não-destrutiva, pela qual, em paralelo à amostra, é irradiado apenas um comparador/padrão (técnica “*monostandard*”) para o cálculo da atividade específica. Ela utiliza a convenção de *Högdahl* (De Corte 1986) para o cálculo da concentração dos isótopos em estudo (Hg-203 e Sb-124).

As irradiações foram realizadas no Reator Triga Mark I IPR-R1, localizado no CDTN, em Belo Horizonte. Após o acondicionamento das amostras, a irradiação por 12 horas foi efetuada na mesa giratória do reator onde, a uma potência de 100 kW, o fluxo de nêutrons térmicos é da ordem de $6,6 \times 10^{11} \text{ n.s}^{-1}.\text{cm}^2$ e temperatura local em torno de 40°C . Através da reação (n,γ) , foram produzidos entre os diversos radioisótopos os de interesse para esse trabalho: ^{203}Hg (46,6 dias de meia-vida, E_γ de 279,2 keV com intensidade de 81,5%) e o ^{124}Sb (60,2 dias de meia-vida, E_γ de 602,7 keV com intensidade de 98,1%). Na irradiação, as amostras foram acompanhadas por padrão de sódio comparador, em triplicata e material de referência certificado. Após a irradiação e esperado um período de 10 dias para decaimento de radionuclídeos interferentes, foi realizada a espectrometria gama por um detetor de germânio de alta pureza (*high pure Ge*), Ortec, modelo 10175-P, resolução de 1,85 no pico de 1332 keV do ^{60}Co e eletrônica associada (fonte de alta tensão, pré-amplificador e amplificador). Os espectros obtidos foram analisados pelo *software* Gennie PC, Canberra, e as concentrações calculadas por meio da convenção de *Högdahl*. Todas as análises foram feitas em duplicata.

3.4.1.5 - Espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio (CV-AAS) e espectrometria de absorção atômica convencional (AAS)

A espectrometria de absorção atômica é um método baseado na medida da energia absorvida pela excitação do átomo nas zonas do visível e ultravioleta. No caso da absorção atômica convencional com chama (AAS), faz-se passar uma luz do comprimento de onda de ressonância através de uma chama contendo átomos no estado fundamental do elemento a ser analisado. Uma parte dessa luz será absorvida e a extensão da absorção é proporcional ao número de átomos no estado fundamental presente na chama. A AAS foi utilizada para a determinação das concentrações de Cd e Pb, em testes de lixiviação. O equipamento utilizado foi o CG-Analítica, modelo GBC 380.

Na espectrometria de absorção atômica do vapor frio (CV-AAS) a atomização do Hg se dá por intermédio da reação com o cloreto estanoso (SnCl_2), e não pela chama, aproveitando a volatilidade do mercúrio elementar. Os íons de Hg são reduzidos à forma elementar e carregados por gás argônio até o caminho óptico, onde os átomos sofrem interação com a radiação a 253,65 nm (Micaroni et al. 2000). Os equipamentos utilizados foram: Perkin Elmer, modelo FIMS 400 (Laboratório do CDTN) e CG-Analítica, modelo GBC Avanta 380 (Laboratório de Hidrobiologia e Limnologia Ltda. - Limnos).

3.4.1.6 - Espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES)

A espectrometria de plasma é uma técnica analítica multielementar, mostrando alta sensibilidade e limites de detecção muito baixos. Seu princípio baseia-se na excitação dos elementos em solução por meio de um plasma de argônio, sustentado por um meio magnético gerado por uma bobina de rádio-frequência. O plasma pode atingir temperaturas de até 10.000 °C, diminuindo os efeitos da matriz. A técnica ICP-AES foi utilizada para análise elementar do pó de fósforo. O equipamento utilizado foi o da marca Spectroflame, modelo FMV 05 Scanner. As amostras (alíquotas de 0,2 a 0,5 g) foram solubilizadas em HCl concentrado até a secura e retomadas em HCl 10% (v/v).

3.4.1.7 – Gravimetria

A análise gravimétrica ou análise quantitativa por peso é o processo em que se isola e pesa um elemento ou composto definido do elemento sob uma forma tão pura quanto possível. A

análise gravimétrica é relacionada com a transformação do elemento ou do radical a ser determinado em um composto estável puro que pode ser prontamente convertido numa forma adequada à pesagem (Vogel 1981).

Neste trabalho, a análise gravimétrica foi utilizada para determinação do teor de sílica em vidros de lâmpadas de mercúrio. A separação da sílica foi efetuada pelo método de precipitação.

O procedimento analítico utilizado foi o seguinte (Nazareth e Silva 1998a):

- a) pesar 0,5 g da amostra;
- b) transferir para um béquer, umedecer com água e adicionar 25 mL de HCl 1:1;
- c) aquecer a solução em chapa elétrica, adicionar com uma pipeta, gotas de cloreto estânico, até desaparecer a cor amarelada que evidencia a presença de ferro;
- d) levar à secura e retornar com 25 mL de HCl 1:1;
- e) aquecer a solução novamente até a dissolução do precipitado;
- f) filtrar o resíduo em filtro de papel faixa branca;
- g) lavar com água destilada quente (esta lavagem deve ser eficiente para remover os resíduos que não sejam SiO₂);
- h) levar o precipitado à mufla para calcinação, à temperatura de 750 – 800 °C;
- i) resfriar em dessecador e pesar;
- j) calcular a concentração de SiO₂ em % pela equação 1:

$$\text{SiO}_2 (\%) = (P_1 - P_2) \times 100 \times (M_a)^{-1} \quad (1)$$

Onde :

P₁ = massa do cadinho + amostra calcinada; P₂ = massa do cadinho vazio;

M_a = massa inicial da amostra.

3.4.1.8 – Espectrometria de absorção molecular (Colorimetria)

A espectrometria de absorção molecular (Colorimetria) é um método de determinação quantitativo, que compara a densidade de cor da amostra com a de padrões. O elemento a ser quantificado é convertido em uma solução colorida, onde a intensidade da cor será proporcional à concentração. Essa cor sofrerá absorção diferencial na região do visível para um comprimento de onda específico, sendo possível determinar a quantidade do elemento. Este método foi utilizado para determinar P₂O₅ em matriz de pó de fósforo (Vogel 1981).

O princípio do método é o seguinte: o P_2O_5 forma um complexo amarelo com o *composité* (solução complexante), cuja intensidade pode ser determinada a 425 nm, em espectrofotômetro de absorção molecular Micronal B 382. O procedimento analítico adotado foi (Nazareth e Silva 1998b):

1) Preparação dos reagentes:

a) *composité*: dissolver 20 g de molibdato de amônio $[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$ em água, à $\pm 60^\circ C$. Adicionar 1 g de metavanadato de amônio (NH_4VO_3) e depois de dissolvido, adicionar 140 mL de HNO_3 (concentrado). Avolumar a 1000 mL;

b) solução padrão de P_2O_5 ($1.000 \mu g \cdot g^{-1}$): pesar 1,8637 g de $(NH_4)_2PO_4$ (99,8%), previamente seco à $110^\circ C$ por 60 minutos. Dissolver em água e diluir para 1.000 mL.

2) Procedimento analítico

a) pesar 0,5 g de pó de fósforo;

b) transferir para um béquer, umedecer com água e adicionar 50 mL de HCl 1:1;

c) aquecer a solução em chapa elétrica, agitando-se de vez em quando com movimentos circulares, evitando atingir a ebulição, até a dissolução da amostra;

d) filtrar a solução em filtro papel faixa preta;

e) avolumar e homogeneizar a solução;

f) do filtrado, pipetar uma alíquota da amostra em balão de 100 mL;

g) em balões de 100 mL adicionar, também, padrões de 1.000, 2.000 e 3.000 $\mu g \cdot g^{-1}$ para análise em paralelo;

h) adicionar 25 mL do *composité*;

i) completar o volume com água e homogeneizar;

j) fazer leitura (absorbância) a 425 nm (λ), usando o branco como referência;

k) calcular a concentração de P_2O_5 em % pela equação 2:

$$P_2O_5 (\%) = \text{leitura} \times \text{fator} \times [10.000 \times (\text{alíquota em g})]^{-1} \quad (2)$$

Onde:

fator = concentração de P_2O_5 no padrão \times (leitura do padrão correspondente) $^{-1}$.

3.4.1.9 - Potenciometria

A potenciometria é a técnica de se medir o potencial de eletrodo para determinar a concentração de uma espécie iônica em solução (Vogel 1981). No presente trabalho foram

utilizados eletrodos de íon-seletivos (eletrodos sólidos, específicos de F⁻ e Cl⁻) para a determinação das concentrações de F e Cl no pó de fósforo.

O procedimento analítico utilizado foi o seguinte (Nazareth e Silva 1998c):

- a) pesar 1,0 g da amostra e passar para cadinho de Ni ou Pt;
- b) adicionar 3,0 g de Na(OH) – PA, levar ao forno para fusão à temperatura de 400 °C, durante 30 minutos;
- c) após esse tempo, dissolver o fundido com água quente (50 a 70 °C) e avolumar para balão de vidro de 250 mL;
- d) esperar esfriar e coletar uma alíquota de 25 mL;
- e) ajustar o pH entre 5 e 6, utilizando Na(OH) diluído de 1 a 10%;
- f) adicionar uma solução tampão de citrato de sódio (ajustador da força iônica), 1 mol.L⁻¹, ajustada para pH 5 a 6, utilizando-se ácido cítrico anidro PA.
- g) avolumar a alíquota para balão de 100 mL; esperar esfriar para temperatura ambiente;
- h) fazer curva padrão utilizando uma solução de NaF ou NaCl (conforme o íon a ser determinado), em concentração de 1, 10 e 100 µg.g⁻¹;
- i) utilizar um medidor de pH (pH-metro Digimed DM 21) com o eletrodo de íon-seletivo para leitura da concentração (potenciometria direta).

3.4.1.10 - Análises físicas (densidade e análise granulométrica)

As análises físicas compreenderam:

■ determinação da granulometria do pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes, na faixa do subpeneiramento (abaixo de 400 mesh = 37µm), utilizando equipamento *Cyclosizer Warman* (elutriador a úmido), modelo M-4. Nesse equipamento, ciclones invertidos são usados de forma a permitir a recirculação contínua do *underflow* e, assim, produzir uma separação mais precisa. A classificação é conduzida em uma série de cilindros cônicos, cujos diâmetros das aberturas diminuem sucessivamente. Por essa razão, a velocidade do fluido aumenta a cada estágio, possibilitando a retenção das partículas mais grossas nos vasos maiores, e das mais finas nos vasos seguintes. Na rotina técnica utilizada, foram ressaltados os seguintes pontos (Warman 1965, Caldeira e Luz 1996):

- a amostra não deve ser solúvel em água;
- a granulometria da amostra deve estar abaixo de 400 mesh (37 µm);

- quantidade de amostra a ser utilizada nos testes: 15 a 30 g;
- a amostra deve estar totalmente desaglutinada e não deve conter floculante;

O procedimento analítico é o seguinte:

- adicionar, para cada amostra, 150 mL de água e 10 mL de pirofosfato de sódio – $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (dispersante), de concentração igual a $0,015 \text{ g.L}^{-1}$; deixar sob agitação vigorosa durante 30 minutos;
- transferir a polpa obtida para o porta-amostra do Cyclosizer e operar a uma pressão de água de 11,4 L/minuto. Tempo de elutriação: 30 minutos;
- decorrida a elutriação da amostra, retirar as frações de cada ciclone e deixar secar em estufa ou naturalmente;
- após a pesagem das frações retidas, calcular o tamanho efetivo de partículas (d_e), a partir do tamanho limitador de partículas (d_L) de cada um dos ciclones e das condições de teste (equação 3): temperatura (f_1), fluxo de água (f_2), tempo de elutriação (f_3) e massa específica (f_4).

$$d_e = d_L \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad (3)$$

■ determinação de densidade (massa específica) do pó de fósforo, utilizando o método do picnômetro a vácuo (CDTN/CNEN 1985), tendo como líquido penetrante de referência o álcool. O procedimento utilizado foi o seguinte:

- pesar o picnômetro, previamente limpo e seco em estufa à $110 \text{ }^\circ\text{C}$;
- colocar no picnômetro, através de um funil, $\pm 5,0 \text{ g}$ da mostra (granulometria abaixo de 100 mesh), previamente seca em estufa a $110 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 60 minutos. Pesas e anotar;
- adicionar álcool até a metade do picnômetro e agitar lentamente;
- levar o picnômetro ao dessecador ligado a vácuo de $\pm 600 \text{ mm}$ de Hg, durante 20 minutos, até o desaparecimento de bolhas de ar;
- completar o volume do picnômetro com álcool, adicionando-o vagarosamente pelas paredes do aparelho para que a amostra se mantenha inerte no fundo do mesmo. Pesas e anotar; lavar o picnômetro, retirando toda a amostra, secar em estufa a $110 \text{ }^\circ\text{C}$, esfriar em dessecador, aferir com álcool. Pesas e anotar. As pesagens que envolvem álcool, devem ser feitas rapidamente, para evitar a volatilização do mesmo e uma possível absorção de umidade;

f) proceder o cálculo da densidade da amostra ($D_{amostra}$) utilizando a equação 4:

$$D_{amostra} = (B - A) \times [(B - A + E) - C]^{-1} \times d_0 \quad (4)$$

Onde:

A = massa do picnômetro vazio;

B = massa do picnômetro + amostra;

B - A = massa da amostra;

C = massa do picnômetro + amostra + álcool (após a dessecação);

E = massa do picnômetro + álcool (item f);

[(B - A + E) - C] = massa do álcool deslocado; d_0 = densidade do álcool (0,81 g.cm⁻³).

3.4.1.11 - Termodesorção de mercúrio

Amostras de pó de fósforo e vidro foram analisadas em um equipamento de termodesorção/absorção atômica descrito em literatura, Figura 3.1 (Windmöller et al. 1996). As amostras de pó de fósforo foram apenas homogeneizadas por agitação manual, para evitar alterações, e submetidas a aquecimento a 33 °C/min (temperatura controlada por um tiristor), da temperatura ambiente até 570 °C, em um forno constituído de um tubo de quartzo envolto por uma bobina de Ni-Cr. Uma corrente de nitrogênio, que passa constantemente pela amostra, leva os vapores gerados pelo aquecimento para a cela de detecção de um Espectrofotômetro de Absorção Atômica CG-Analítica (modelo GBC 380). A temperatura acima da amostra é monitorada por um termopar. Dessa forma obtêm-se registros de unidades de absorbância em função de temperatura acima da amostra, denominados termogramas. Esses registros dão informações da força de interação do mercúrio com a matriz, e podem ser comparados com registros de padrões de mercúrio. As análises foram feitas em amostras com massas variando até 40 mg, conforme o conteúdo de mercúrio total, e foram realizadas, pelo menos, em triplicata. Na maioria das vezes, o fluxo de nitrogênio utilizado foi de 200 mL/min; alguns testes foram feitos com fluxos mais elevados para que se pudesse aumentar a massa da amostra utilizada. Amostras de vidro de lâmpadas fluorescentes - uma de lâmpada usada/queimada e outra de lâmpada nova (ambas com massa de 200 mg) - foram também submetidas a testes de termodesorção. O pó de fósforo existente nas amostras originais de vidro foi retirado cuidadosamente com auxílio de jato de água. As amostras de vidro, após secas e em pequenos cacos, foram submetidas diretamente ao aquecimento até 800 °C (temperatura máxima permitida pelo equipamento). O procedimento analítico foi semelhante ao adotado para as amostras em matriz de pó de fósforo.

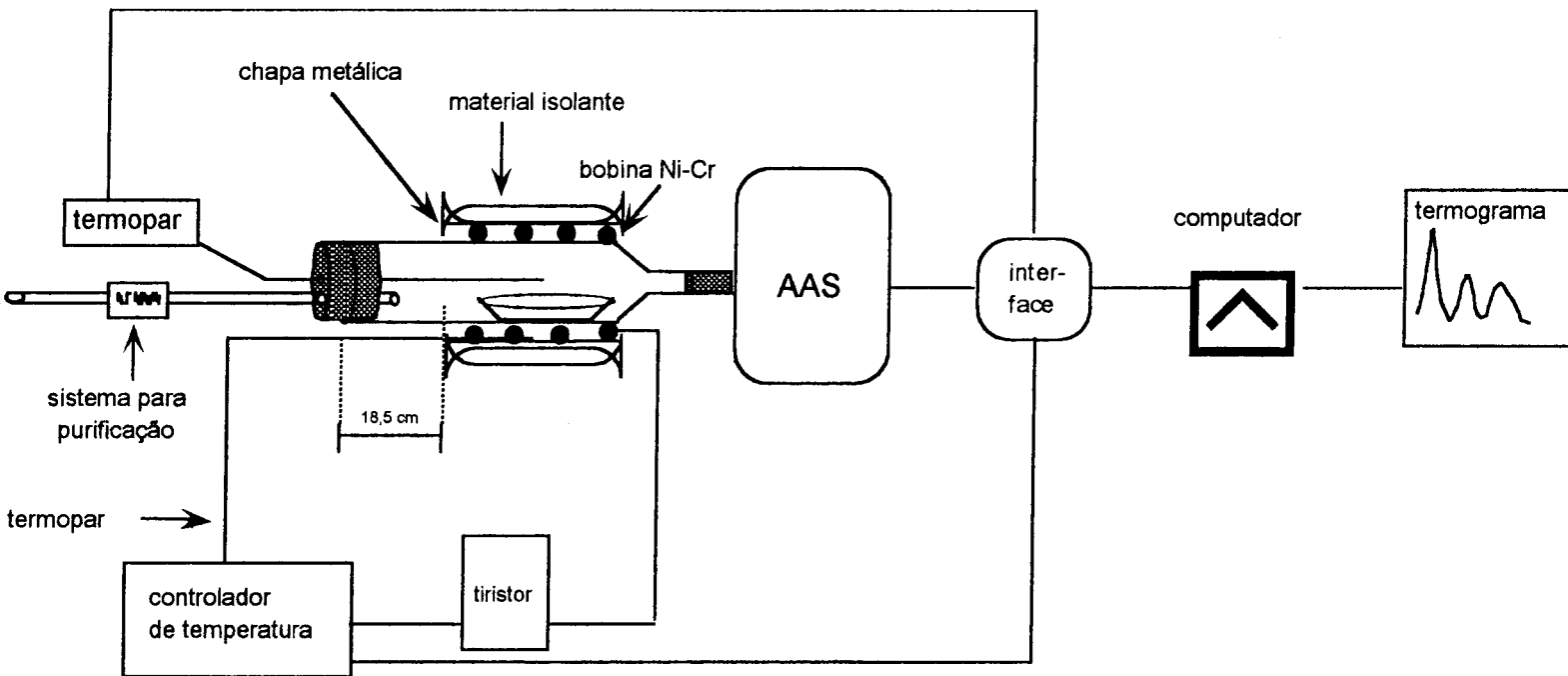


Figura 3.1 - Desenho esquemático do sistema de termodesorção/absorção atômica – TDAAS (Windmüller et al. 1996).

3.4.1.11.1 - Preparação e análise de amostras dopadas

Foram preparadas cinco amostras dopadas com padrões de mercúrio, para comparação com as amostras em estudo e também para verificar se o mercúrio presente nos padrões adicionados poderia apresentar comportamento diferente. Estas foram preparadas a partir de amostras de pó de fósforo original, que passaram por tratamento térmico prévio para a retirada do mercúrio existente.

Termogramas foram efetuados para controlar a ausência de mercúrio na matriz tratada. Em seguida, cada matriz dopada foi preparada adicionando-se cada um dos padrões das espécies de mercúrio (fabricados pela Riedel-de Haen/Fluka - Alemanha, pureza de 99,5%): Hg^0 , Hg_2Cl_2 , HgCl_2 , HgO e HgS (*synthetic red cinnabar*) com o pó de fósforo tratado, até se conseguir uma concentração de $5.000 \mu\text{g.g}^{-1}$ de mercúrio (pressuposto de um conteúdo médio por lâmpada de 30 mg de Hg em 6 g de pó de fósforo). As amostras dopadas por mercúrio foram homogeneizadas por maceramento em grau de ágata e analisadas imediatamente após a preparação, para registro da temperatura de dessorção. Termogramas subsequentes foram registrados a vários intervalos de tempo a fim de investigar os possíveis efeitos ou interações da matriz com as espécies adicionadas.

3.4.1.11.2 - Testes com amostras de vidro

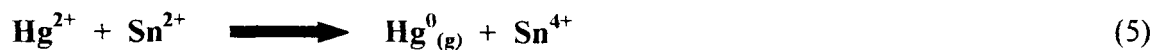
Foram testadas duas amostras de vidro de lâmpadas fluorescentes - uma de lâmpada usada/queimada e uma de lâmpada nova (ambas com massa de 200 mg). O pó de fósforo existente nas amostras originais foi retirado cuidadosamente com auxílio de jato de água. Após secas as amostras de vidro foram analisadas por termodesorção. O procedimento analítico utilizado foi semelhante ao utilizado para amostras dopadas e matriz de pó de fósforo. As amostras foram submetidas ao aquecimento até $800 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura máxima permitida pelo equipamento).

3.4.2 - Procedimentos analíticos para análises de Cd, Hg e Pb

3.4.2.1 - Análises de mercúrio e cádmio em matriz de pó de fósforo e chumbo em vidro

Análises preliminares de mercúrio mostraram que a matriz de pó de fósforo não é homogênea, pois os resultados não se reproduziram. Foram testadas, então, quatro alíquotas: 0,1 - 0,2 - 0,5 e 1,0 g. A melhor reprodutibilidade (>95%) foi alcançada a partir da alíquota de 0,5 g.

Foram então utilizadas alíquotas de 0,5 g, solubilizadas com solução de HNO₃ (2:1) e, em seguida, levadas para volume final de 1.000 mL. Após a diluição adequada procedeu-se à análise por CV-AAS, usando-se SnCl₂ como agente redutor. O Hg²⁺ solubilizado foi reduzido a Hg⁰, conforme a reação/equação 5:



As análises de chumbo foram realizadas na matriz de vidro do bulbo externo de lâmpada a vapor de mercúrio. As determinações de Cd, Hg e Pb foram feitas conforme os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association et al. 1995). Todas as análises foram feitas em duplicata.

3.4.2.2 - Testes de lixiviação de resíduos (parâmetros: Cd, Hg e Pb)

Os testes de lixiviação foram realizados em conformidade com a Norma ABNT NBR 10.005 (1987b) para os elementos Cd e Hg, em resíduos de lâmpadas fluorescentes tubulares, e Pb, em resíduos de lâmpadas a vapor de mercúrio (vidro do bulbo externo), em base seca.

Os pontos principais dessa norma a serem ressaltados são:

- a) amostra representativa do resíduo: > 100 g;
- b) tamanho da partícula: < 9,5 mm (as amostras de laboratório foram pulverizadas a uma granulometria da ordem de 200#, ou seja, 74 µm);
- c) adição de água deionizada à massa: proporção de 16:1 (água/massa de resíduo);
- d) ajuste do pH da mistura: correção para (5,0 ± 0,2), mediante adição de ácido acético (CH₃COOH) 0,5 N. O ácido acético é utilizado para simular as condições inadequadas mais comuns de deposição, onde resíduos são colocados em conjunto com resíduos orgânicos domiciliares em lixões;
- e) medição do pH: iniciada a agitação, o pH deve ser medido em três etapas. A primeira, após 15 minutos, a segunda após 30 minutos e a terceira após 60 minutos, contados a partir do final da etapa anterior. Se houver variação do pH em qualquer uma das etapas, deve-se corrigi-lo para (5,0 ± 0,2) e repetir essa etapa até que a variação do pH seja ≤ 0,5 unidades. Quantidade máxima de ácido: 4 mL.g⁻¹ da massa do sólido;
- f) agitação da mistura: após a correção inicial do pH, a mistura é agitada por um período de 24 h, podendo estender-se por mais quatro horas (total de 28 h) caso o pH não seja ajustado para (5,0 ± 0,2);

g) adição final de água deionizada: terminada a agitação, deve-se adicionar uma quantidade m_1 de água deionizada calculada pela equação 6:

$$(m_1 = 4m - m_2) \quad (6)$$

Onde:

m_1 = massa de água deionizada, m = massa da amostra submetida ao ensaio e m_2 = massa de ácido acético 0,5 N;

h) separação das fases líquida e sólida: após a adição da água deionizada, a fase líquida da mistura deve ser separada da fase sólida, em equipamento de filtração que permita a separação de todas as partículas de diâmetro $\geq 0,45 \mu\text{m}$;

i) lixiviado: a fase líquida assim obtida constitui o lixiviado, que é submetido à análise química para verificação da periculosidade do resíduo. Prova: para cada amostra deve ser realizada uma prova em branco para verificar se não houve contaminação.

3.4.2.3 - Teste de solubilização de resíduos (parâmetro: Cd)

Este teste foi realizado somente para o cádmio em resíduos de lâmpadas fluorescentes, uma vez que os testes de lixiviação para este elemento mostraram valores inferiores ao limite regulatório constante no Anexo H – Listagem nº 8 da Norma ABNT NBR 10.004 (1987a).

O procedimento utilizado é o descrito na Norma ABNT NBR 10.006 (1987c), cujos pontos mais importantes são:

- a) amostra representativa do resíduo: 250 g;
- b) tamanho da partícula: $< 9,5 \text{ mm}$ (para a determinação de cádmio as amostras foram pulverizadas a uma granulometria da ordem de 200#, ou seja, $74 \mu\text{m}$);
- c) adição de água deionizada à massa: 1000 mL, seguida de agitação em baixa velocidade, em frasco de 1500 mL, por 5 minutos;
- d) tempo de descanso da amostra: 7 dias;
- e) filtragem: filtrar a mistura com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante que permita a separação de todas as partículas de diâmetro $\geq 0,45 \mu\text{m}$. Filtrado: a fase líquida obtida após a filtragem é submetida à análise química para verificação do constituinte solubilizado;
- f) controle de análise: a operação deve ser realizada em duplicata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – DESCARTE DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

4.1.1 - Estudo prospectivo sobre descarte de lâmpadas de mercúrio no Estado de Minas Gerais

O estudo prospectivo sobre o descarte de lâmpadas de mercúrio no Estado de Minas foi realizado graças ao apoio e cooperação de entidades como as elencadas a seguir, que permitiram o acesso a seus bancos de dados contendo nome de empresas, telefones e endereços:

- Fiemg - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (representante do setor industrial);
- FCEMG - Federação do Comércio do Estado de Minas Gerais (setor comercial);
- AHMG - Associação dos Hospitais de Minas Gerais (setor hospitalar) e
- AMM - Associação Mineira de Municípios (prefeituras municipais).

Após o planejamento do projeto de pesquisa, contendo as especificações a respeito do foco do problema ambiental, objetivo e método de coleta de dados, foi elaborado um questionário para investigação quantitativa. Antecedendo o envio desse questionário, foi realizado um pré-teste, aplicado a um grupo de empresas/órgãos públicos, objetivando à avaliação da percepção do assunto pelo entrevistado/informante e das possíveis dificuldades a serem encontradas no preenchimento do questionário que, em seguida, foi enviado, via correio (mala direta ou carta), fax e e-mail, aos setores de meio ambiente/segurança ou responsáveis pelas indústrias, estabelecimentos comerciais, hospitais e órgãos públicos (municipais, estaduais e federais).

4.1.1.1 – Carta-questionário

A carta-questionário teve uma parte introdutória, contendo texto explicativo sobre o objeto da pesquisa, seguida de três questões básicas. A primeira foi utilizada para identificação do entrevistado; a segunda, fechada, com opção de múltipla escolha (mutuamente excludentes); e a terceira, quantitativa, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Questionário utilizado na pesquisa de *survey*.

QUESTÃO 1

Qual é o nome e atividade principal de sua empresa/órgão público?

QUESTÃO 2

De que maneira é feito o descarte de lâmpadas de mercúrio em sua empresa/órgão?

Diretamente no Lixo?

Por reciclagem?

Se por outra modalidade, especifique.

QUESTÃO 3

Qual é o volume do descarte mensal de lâmpadas em sua empresa/órgão?

Fluorescentes _____

Vapor de mercúrio e/ou sódio _____

No Anexo 1, encontra-se anexada cópia da carta-padrão enviada às empresas associadas/afiliadas à Fiemg. Cartas de igual teor foram enviadas aos associados da FCEMG e AHMG, às prefeituras municipais e órgãos públicos.

4.1.1.2 - Plano amostral

■ Pesquisa no setor industrial

Os critérios de seleção foram o tamanho, importância relativa da empresa e sua distribuição geográfica. Foram selecionadas 514 empresas, sendo 331 localizadas na região polarizada de Belo Horizonte (à qual foi dada maior ênfase), 22 na região norte do Estado de Minas, 22 na região leste, 65 na região sul e 74 na região oeste.

■ Pesquisa no setor público

O critério foi direcionar a pesquisa às prefeituras municipais com população superior a 30.000 habitantes, bem como aos órgãos municipais, estaduais e federais existentes na cidade de Belo Horizonte. Número de prefeituras contatadas: 70; órgãos públicos: 50.

■ Pesquisa nos setores hospitalar e comercial

O critério foi contatar os principais hospitais e estabelecimentos comerciais associados à AHMG e FCEMG, respectivamente. Número de hospitais: 234; estabelecimentos comerciais: 247.

4.1.1.3 - Avaliação das respostas e resultados do levantamento

Os dados obtidos foram tabulados e separados de acordo com os setores preestabelecidos, e analisados utilizando-se os recursos da informática e técnicas de estatística descritiva. Os principais resultados foram:

4.1.1.3.1 - Avaliação dos dados

Em adição às informações preliminares, foram considerados para a elaboração do plano amostral: (1) importância relativa dos setores selecionados; (2) capacidade organizacional diferenciada das empresas e órgãos públicos pesquisados e (3) enfoque no setor que, sabidamente, já estava adotando o processo de reciclagem para a descontaminação dos resíduos de lâmpadas de mercúrio (setor industrial). O tipo de amostragem utilizada foi sistemática e a amostra obtida pode ser denominada de amostra não-probabilística (*purposive sampling*)⁴ (Babbie 1999, Trochim 1999), porque foi obtida por meio de respostas voluntárias a um questionário e realizada com propósito determinado (ênfase nos principais setores da economia mineira e de maior acessibilidade). Foram enviadas 1.115 cartas-questionário e recebidas 341 respostas, o que representa 31% das cartas enviadas. Considerando a taxa de retorno em cada setor (relação questionário recebido/questionário enviado), o setor público apresentou maior percentual de respostas (44%), enquanto o setor industrial a menor resposta (22%). Nos setores hospitalar e comercial, os percentuais corresponderam a 31 e 41%, respectivamente. Percebeu-se que as empresas privadas e órgãos públicos desconhecem, de modo geral, os efeitos prejudiciais do mercúrio ao meio ambiente e à saúde humana. Isto pode ser resultado, em parte, da ausência de uma legislação específica para o controle do descarte de lâmpadas. Tais empresas/órgãos não sabem como gerenciar seus resíduos perigosos e como quantificá-los. Em consequência, apresentaram, via de regra, resistência em fornecer informações com receio de que elas pudessem ser utilizadas contra a empresa. Isso explica a elevada percentagem das não-respostas (não-retorno da Carta-Questionário) em todos os setores pesquisados.

4.1.1.3.2 - Perfil das empresas e órgãos públicos pesquisados

O setor industrial foi representado por empresas siderúrgicas, papel e celulose, mineração, montadora de veículos, construção pesada e civil, indústrias de transformação, indústrias de adubos e fertilizantes, refratários/cerâmicas, processamento de alimentos, telecomunicações, cimenteiras, cervejarias, laticínios e metalúrgicas. O setor hospitalar, por hospitais, clínicas e casas de saúde, maternidades, cooperativas de saúde e sanatórios. O setor comercial, por estabelecimentos comerciais de um modo geral, tais como bancos, colégios privados, *shopping centers*, cooperativas, universidades, atacadistas, supermercados e prestadores de serviços. Por fim, o setor público (municipal, estadual e federal), por

⁴ A diferença entre amostragem não-probabilística e amostragem probabilística é que a não-probabilística não envolve seleção alcatória. e a probabilística envolve (Trochim 1999).

prefeituras municipais com população superior a 30.000 habitantes, estabelecimentos públicos, bancos, corporação militar, empresa de correios, fundações e órgãos de pesquisa.

4.1.1.3.3 - Descarte de lâmpadas

Na Tabela 4.2 encontra-se apresentado o quadro geral do descarte mensal de lâmpadas nas 341 empresas/órgãos públicos que responderam às cartas-questionário. Foi contabilizado um descarte mensal total de 90.718 lâmpadas, sendo 58% representados por lâmpadas fluorescentes e 42% por lâmpadas de descarga. Do número total de respondentes, 64% estão concentrados na região polarizada⁵ de Belo Horizonte, acumulando um descarte mensal de 44.452 lâmpadas (49%). A distribuição desigual de descarte observada na pesquisa é reflexo do desequilíbrio interno de renda, que se expressa na composição setorial da economia mineira. Na Tabela 4.2 é mostrado também que nos setores hospitalar, comercial e industrial, mais de 90% do descarte são representados por lâmpadas fluorescentes, enquanto no setor público 64% do descarte são representados por lâmpadas de descarga. O setor público é de longe o maior gerador de descarte (64%), seguido pelos setores industrial (25%), comercial (8%) e hospitalar (3%). O amplo predomínio de descarte pelo setor público é justificado, primeiro pelo elevado número de lâmpadas de descarga utilizadas na iluminação pública e, segundo, pelo elevado número de respostas.

4.1.1.4 - Modalidades de descarte (Práticas correntes)

Quanto às modalidades pelas quais as lâmpadas são descartadas, ficou configurado o que já se tinha como premissa, ou seja, os descartes são efetuados, basicamente, por três modalidades: (a) diretamente no lixo (45%); (b) por reciclagem (47%) e (c) por outra modalidade (8%). O descarte que mais chama a atenção é o constituído pelas modalidades (a) e (c), que perfazem 53%, porque caracteriza uma agressão ao meio ambiente. A Figura 4.1 mostra, em termos absolutos, os descartes mensais nos quatro setores pesquisados (os percentuais representativos dizem respeito a cada setor individualizado), de acordo com cada uma das modalidades. No setor comercial, 100% de todo o descarte é feito diretamente no lixo, numa nítida agressão ao meio ambiente.

⁵ **Região polarizada** é aquela que reúne diferentes localidades subordinadas a um núcleo ou centro urbano dominante, em decorrência do surgimento de laços de dependência e interdependência econômica e político-administrativa, e a cristalização de relações funcionais entre os lugares (Matos 1999).

Tabela 4.2 – Empresas e setores pesquisados, quantitativo mensal de lâmpadas de mercúrio e modalidades de descarte no Estado de Minas Gerais.

Modalidades de descarte	Empresas pesquisadas (número)						Quantitativo de descarte (número)										Total	%
	Setor						Lâmpada fluorescente (LF)					Lâmpada a vapor de mercúrio (LD)						
	P	H	C	I	Total		P	H	C	I	Total	P	H	C	I	Total		
Lixo	42	68	102	74	286		18.615	2.396	7.002	6.939	4.940	120	257	461	40.730	45		
Reciclagem	3	-	-	25	28		260	-	-	12.282	29.166	-	-	610	42.318	47		
Outra modalidade	8	5	-	14	27		1.858	618	-	2.254	2.470	9	-	461	7.670	8		
Subtotal	53	73	102	113	341		20.733	3.014	7.002	21.475	36.576	129	257	1.532	90.718	100		
Total	341						52.224										38.494	
%	16	21	30	33	100		58					42						

P = Público; H = Hospitalar; C = Comercial; I = Industrial; LF = Lâmpadas Fluorescentes; LD = Lâmpadas de Descarga.

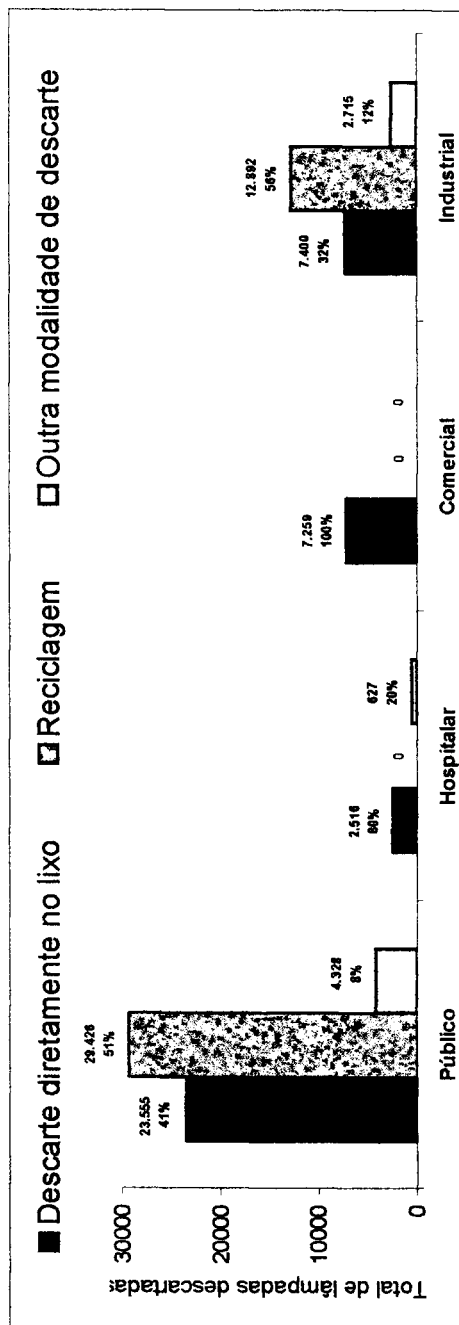


Figura 4.1 – Número total de lâmpadas de mercúrio descartadas por mês em cada um dos setores pesquisados (percentual contabilizado por setor), de acordo com as modalidades de descarte.

No setor hospitalar todo o descarte é feito diretamente no meio ambiente, quer diretamente no lixo (80%), quer por outra modalidade (20%); nos setores público e industrial o maior percentual é representado pelo descarte por meio da reciclagem, respectivamente 51% e 56%, enquanto o restante, em cada setor, corresponde ao que é descartado no meio ambiente, 49% e 44%. Do total geral de empresas, poucas processam a reciclagem dos seus resíduos gerados: 3 no setor público (1%) e 25 no setor industrial (7%). Provavelmente, as empresas que reciclam seus resíduos tiveram maior interesse em responder à carta-questionário. É interessante observar, nesses setores, que a preocupação com a preservação do meio ambiente já é uma realidade em termos de importância e significação, o que não ocorre, nos setores hospitalar e comercial. Entretanto, apesar de o descarte percentual ao meio ambiente nos setores hospitalar e comercial ser elevado, em termos absolutos, a atenção deve ser direcionada para os setores público e industrial, que, conjuntamente, descartam 37.998 lâmpadas/mês ao meio ambiente. Isso equívale a 42% do total de descarte.

Além dos aspectos quantitativos, a pesquisa de *survey* possibilitou levantar, adicionalmente, importantes aspectos qualitativos, os quais se acham consolidados nas seguintes anotações:

- Descarte processado *diretamente no lixo* é aquele efetuado sem nenhuma preocupação com o meio ambiente. As empresas/órgãos públicos repassam os resíduos gerados aos serviços de limpeza urbana municipal. Neste caso, as lâmpadas são, geralmente, quebradas antes mesmo da sua destinação final (lixões e aterros sanitários, de propriedade das prefeituras municipais).
- Descarte processado por reciclagem, que visa à proteção ao meio ambiente e envolve a de-mercurização de lâmpadas de mercúrio. O processamento tem sido feito, preferencialmente, por uma única empresa prestadora de serviços no Brasil. A adoção por esta modalidade envolve um custo, que é suportado financeiramente por empresas que possuem um sistema de gerenciamento ambiental (normalmente certificadas pelas Normas ISO 14.000) e por aquelas que estão à procura de melhores práticas de gerenciamento de seus resíduos.
- Descarte efetuado por *outra modalidade*, diferentemente das anteriores. Neste caso, ainda que erroneamente, existe um manejo de lâmpadas. Entretanto, o descarte culmina agredindo o meio ambiente e expondo riscos a saúde humana. A pesquisa apontou, neste caso, as seguintes modalidades de descarte e disposição final:

“Em aterro particular; em fossas antigas e desativadas; destruídas e enterradas em buracos; incineradas em hospitais; descartadas em empresas do setor siderúrgico (30% no lixo, 70% na caixa de escória); descartadas em depósitos de rejeitos de mineração; destruídas em tambores metálicos; dispostas em pátios juntamente com sucatas; descartadas em pilhas de matéria-prima em empresas do setor cimenteiro, queimadas em lixões nas próprias empresas e cedidas a artesãos.”

É obvio que a maior parte dessas práticas adotadas de descarte são verdadeiras agressões ao meio ambiente e aos ecossistemas; outras, certamente, estão provocando efeitos deletérios aos próprios trabalhadores, como é o caso das incinerações em hospitais e as cedidas a artesãos, e há ainda aquelas que oneram as próprias empresas, que gastam recursos para armazenar as lâmpadas inservíveis em depósitos/galpões.

Ficou registrado, também, a inexistência de cuidados especiais durante o manuseio de lâmpadas, pois em muitas respostas os entrevistados enfatizaram que o procedimento utilizado para o descarte era quebrar inicialmente as lâmpadas e em seguida dar-lhes a destinação final, seja diretamente no lixo, seja por outra solução, muitas vezes igualmente incorreta.

Ainda da pesquisa, foram extraídas as seguintes observações:

- ✓ De uma maneira geral, a troca de lâmpadas usadas/queimadas na iluminação pública em ruas, avenidas, praças, áreas de lazer, rodovias está a cargo de uma empresa distribuidora de energia elétrica, que presta serviços de manutenção (troca de lâmpadas) para centenas de prefeituras municipais. Essa empresa é a maior geradora individual de descarte do Estado.
- ✓ Numa mesma empresa, em três unidades fabris diferentes, foi registrada a adoção de três modalidades diferenciadas para efetuar o descarte.
- ✓ As empresas do setor cimenteiro normalmente descartam suas lâmpadas em pilhas de matéria-prima, juntamente com calcário e argila, para ulterior alimentação em fornos de clínquer (fabricação de cimento).
- ✓ Filiais distintas de uma mesma empresa do setor de autopeças descartam suas lâmpadas no lixo e por reciclagem. Essas opções são diametralmente opostas do ponto de vista ambiental.
- ✓ As empresas do setor hospitalar não utilizam o descarte por reciclagem; o mais comum são os descartes no lixo e por incineração. Foi registrado também um descarte em fossa antiga,

localizada em zona de recarga de aquífero, na encosta da Serra do Curral, em Belo Horizonte.

- ✓ Em muitas empresas, o serviço de troca de lâmpadas usadas/queimadas é feito por terceiros (serviços terceirizados). As prestadoras de serviços descartam tais lâmpadas diretamente no lixo, muitas vezes sem o conhecimento da empresa contratante.
- ✓ Muitas empresas imobilizam recursos com reembalagens, galpões e pessoal para guardar as lâmpadas inservíveis.
- ✓ Muitas empresas resistiram a fornecer dados sobre os seus descartes, com receio de ficarem expostas à fiscalização ambiental (tendência das empresas menos ajustadas em responderem à pesquisa).
- ✓ Muitos geradores de descarte reclamaram ter dificuldades em adotar a alternativa de descarte por reciclagem, pois embora sendo a opção mais correta para a destinação final, a atividade acarreta um custo adicional. Esses custos envolvem, teoricamente, reembalagem de lâmpadas, transbordos, frete até a usina de reciclagem e serviços de de-mercurização. Além do mais, existe o risco de acidente inerente ao transporte. As empresas geradoras de resíduos, salvo algumas exceções, não fazem esse tipo de seguro.
- ✓ A pesquisa recebeu inúmeros incentivos de apoio à iniciativa realizada.

4.1.1.5 - Tratamento estatístico dos dados

Na Tabela 4.3 encontram-se apresentados os valores de referência e uma síntese numérica para os descartes de lâmpadas nos diversos setores e modalidades. Considerando o conjunto de lâmpadas fluorescente e de descarga, o descarte mínimo foi de 1 unidade/mês, enquanto os máximos de 10.000 e 29.166 unidades/mês, para lâmpadas fluorescentes e de descarga, respectivamente.

Os cálculos de medida de posição mostram valores bem discrepantes para a média e mediana. A mediana, que não sofre a influência de valores extremos (*outliers*) reflete melhor a realidade do descarte, principalmente, quando são enormes as diferenças entre os quantitativos de descartes entre os pequenos geradores e os grandes. A forte heterogeneidade dos descartes é mostrada pelos elevados valores de desvio padrão e coeficientes de variação.

O valor que melhor caracteriza o descarte de lâmpadas de mercúrio (fluorescentes e de descarga) é de 26 lâmpadas/mês. Para o meio ambiente (diretamente no lixo e por outra modalidade), esse valor é da ordem de 20 lâmpadas/mês. A diferença entre eles é decorrente da reciclagem.

Tabela 4.3 – Valores de referência e síntese numérica para o descarte mensal de lâmpadas fluorescentes e de descarga no Estado de Minas Gerais.

Variável lâmpada/mês	Setor	Mín.	Máx.	Desvio Padrão	CV	Média	Mediana	Referência	
								P ₀₅	P ₉₅
LF	Público	0	10.000	1.387	355	391	100	20	1.277
	Industrial	1	4.800	520	273	190	33	3	892
	Hospitalar	1	580	86	209	41	15	3	118
	Comercial	1	1.600	205	293	70	8	1	261
Análise Global		0	10.000	643	417	154	20	2	522
LD	Público	0	29.166	4.011	581	690	0	0	1.450
	Industrial	0	231	33	241	14	1	0	50
	Hospitalar	0	20	4	240	2	0	0	11
	Comercial	0	50	8	323	3	0	0	20
Análise Global		0	29.166	2.661	836	318	12	0	280
LF + LD	Público	20	29.166	4.189	387	1081	125	29	2.340
	Industrial	1	4.850	524	258	204	40	4	922
	Hospitalar	1	580	86	200	43	20	3	118
	Comercial	1	1.624	208	293	71	9	1	254
Análise Global		1	29.166	1.708	642	266	26	2	688
LF + LD (no meio ambiente)	Público	0	10.000	1449	275	526	120	12	1.920
	Industrial	0	1.100	186	208	90	20	0	343
	Hospitalar	1	580	86	200	43	20	3	118
	Comercial	1	1.624	208	293	71	9	1	254
Análise Global		0	10.000	612	431	142	20	0	490

P₀₅ = percentil 5; P₉₅ = percentil 95; CV = coeficiente de variação (%) = (desvio padrão/média) x 100 ;

LF = lâmpada fluorescente; LD = lâmpada de descarga (vapor); n = empresas/órgãos consultados (vide Tabela 4.2).

Quanto às estimativas dos valores de referência, 90% das empresas/órgãos públicos do Estado de Minas Gerais descartam lâmpadas de mercúrio, conforme os percentis 5 (P₀₅) e 95 (P₉₅).

De uma forma global, 90% das empresas/órgãos públicos descartam mensalmente entre 2 e 688 lâmpadas de mercúrio; destas, de 0 a 490 vão diretamente ao meio ambiente.

É importante destacar que apenas 3 geradores descartam 44.016 lâmpadas/mês (29.166 e 10.000 unidades pelo setor público, e 4.850 por empresa privada), correspondendo a 49% do descarte total, percentual muito superior ao valor de referência estimado para o Estado de Minas. Esses geradores são considerados *outliers* e foram separados dos demais.

Na Figura 4.2 encontra-se representado o diagrama geral de descarte, onde cada ponto representa o descarte de uma dada empresa/órgão público. Os diagramas individualizados, por setor, exibem o mesmo desenho e características comuns como, por exemplo:

- enorme variabilidade dos dados e forte assimetria das curvas representativas dos descartes (global e individualizados, por setor);
- semelhança nas representações gráfica para os descartes nos diversos setores, com concentração de dados próximos à origem.

4.1.1.6 - Descarte no Estado de Minas Gerais e região polarizada de Belo Horizonte

Na ausência de informações sobre o descarte de lâmpadas no Estado de Minas Gerais, uma alternativa que poderia ser considerada seria, por exemplo, a estimativa baseando-se numa correlação com o IPC.

Admitindo-se, então, como dados de entrada:

- descarte de lâmpadas no Brasil de 48,5 milhões de unidades/ano (Abilux 1998), e
- índice do IPC referente ao Estado de Minas Gerais de 8,507 (Gazeta Mercantil 1998),

o descarte total no Estado de Minas Gerais seria estimado em 4.125.895 unidades de lâmpadas/ano ou 343.825 lâmpadas/mês. Se considerarmos a área de abrangência da pesquisa realizada, que coincide, aproximadamente, com a região polarizada de Belo Horizonte (capital e municípios circunvizinhos), verifica-se que foi possível contabilizar um descarte total de 90.718 unidades de lâmpadas/mês, ou seja, 26,4% do total estimado para o Estado. Esse percentual está aquém do que representa o IPC para a mesma região, que é de 41%, (Gazeta Mercantil 1998). O diferencial existente pode ser atribuído às não-respostas, quantitativos subestimados, quantitativos referente às empresas que não foram consultadas e quantitativo total do setor residencial que não foi avaliado/levantado.

4.1.1.7 - Estimativa de descarte por empresa/órgão público em outros estados brasileiros

Em decorrência da inexistência de dados e admitindo-se que as características do descarte apresentadas nesta pesquisa possam ser extrapoladas, foram feitas estimativas preliminares para outros estados brasileiros, considerando o descarte mediano de 26 lâmpadas/mês obtido para empresas e órgãos públicos do Estado de Minas Gerais, e os Índices de Potencial de Consumo (IPC) referentes a cada estado brasileiro (Tabela 4.4).

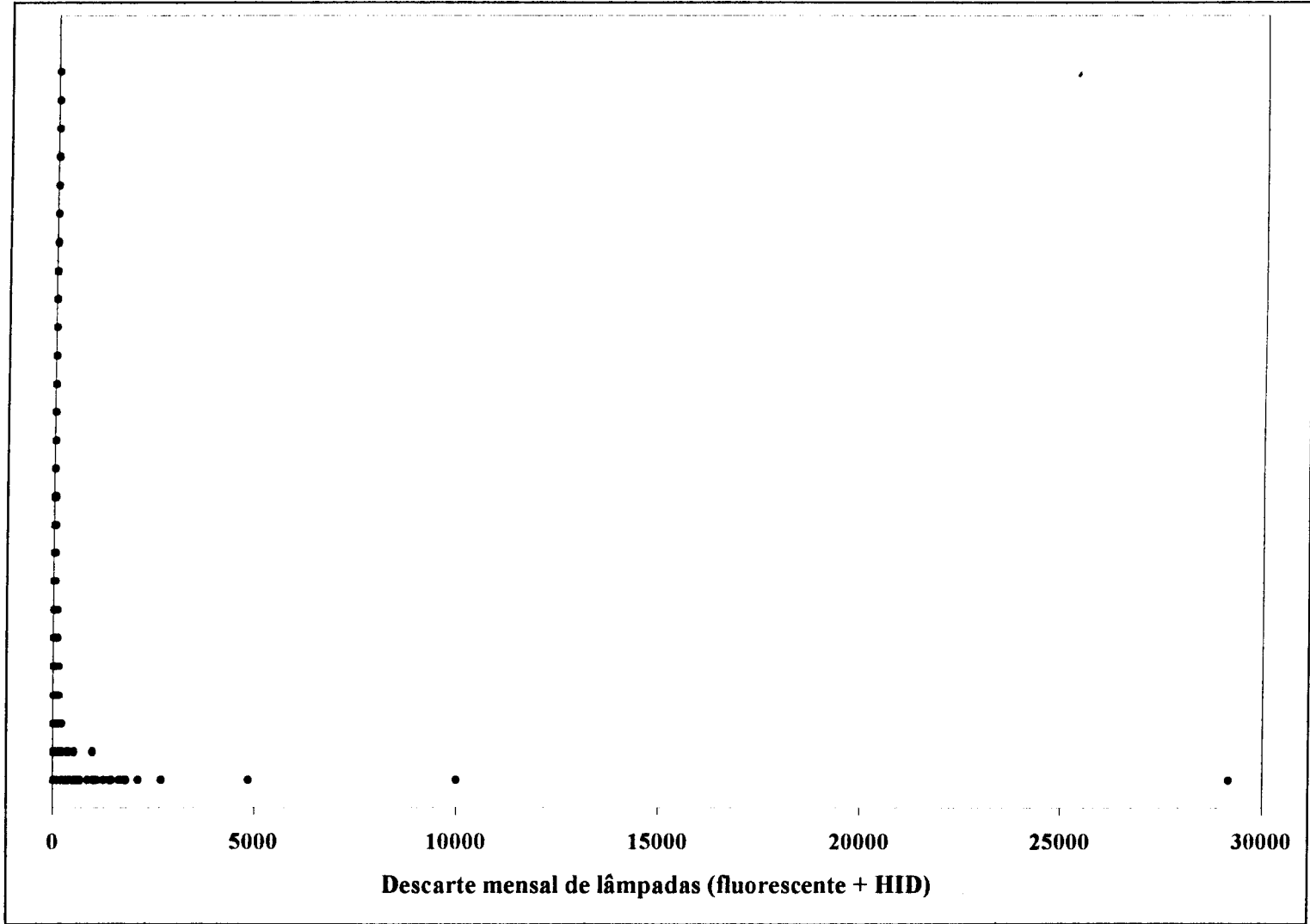


Figura 4.2 – Diagrama global de descarte mensal de lâmpadas (fluorescente + HID), onde cada ponto representa o descarte de uma empresa/órgão público.

As estimativas projetadas foram obtidas considerando-se uma relação direta entre o descarte mediano e o IPC, conforme equação 7.

$$Md_i = 3,06 \times IPC_i \quad (7)$$

Onde:

Md_i representa o descarte mediano de empresas ou órgãos públicos no estado i ; e

IPC_i o Índice Potencial de Consumo no estado i .

Tabela 4.4 - Índice de Potencial de Consumo (IPC) para alguns estados brasileiros.

Estado	IPC (%)
Espírito Santo	1,451
Minas Gerais	8,507
Paraná	5,621
Rio de Janeiro	11,626
Rio Grande do Sul	7,083
Santa Catarina	3,059
São Paulo	34,065

Fonte: (Gazeta Mercantil 1998)

Considerando esta relação, os descartes medianos de empresas ou órgãos públicos, situados em estados da região sudeste e sul, seriam, conforme Figura 4.3: 104 lâmpadas/mês em São Paulo, 36 no Rio de Janeiro, 22 no Rio Grande do Sul, 17 no Paraná, 9 em Santa Catarina e 4 no Espírito Santo.

Os valores projetados podem estar ligeiramente subestimados para os estados mais ricos (Rio de Janeiro e São Paulo) e superestimados para os mais pobres (demais unidades federativas do Brasil), por causa de fatores exógenos que muitas vezes incidem sobre o Índice Potencial de Consumo (IPC).

4.1.1.8 – Divulgação dos dados obtidos (Questão de sigilo)

Conforme mencionado, a pesquisa de *survey* possibilitou a formação de um banco de dados contendo centenas de informações sobre nome de geradores de resíduos, endereços, modalidades e quantitativos de descarte. Isto só foi possível graças ao apoio recebido (Fiemg, FCEMG e AHMG) e ao envolvimento de um centro de pesquisa federal (CDTN/CNEN) e de uma universidade federal (Degeo/Ufop). Por questões éticas e objetivando resguardar os respondentes, algumas informações não foram identificadas nominalmente neste trabalho.

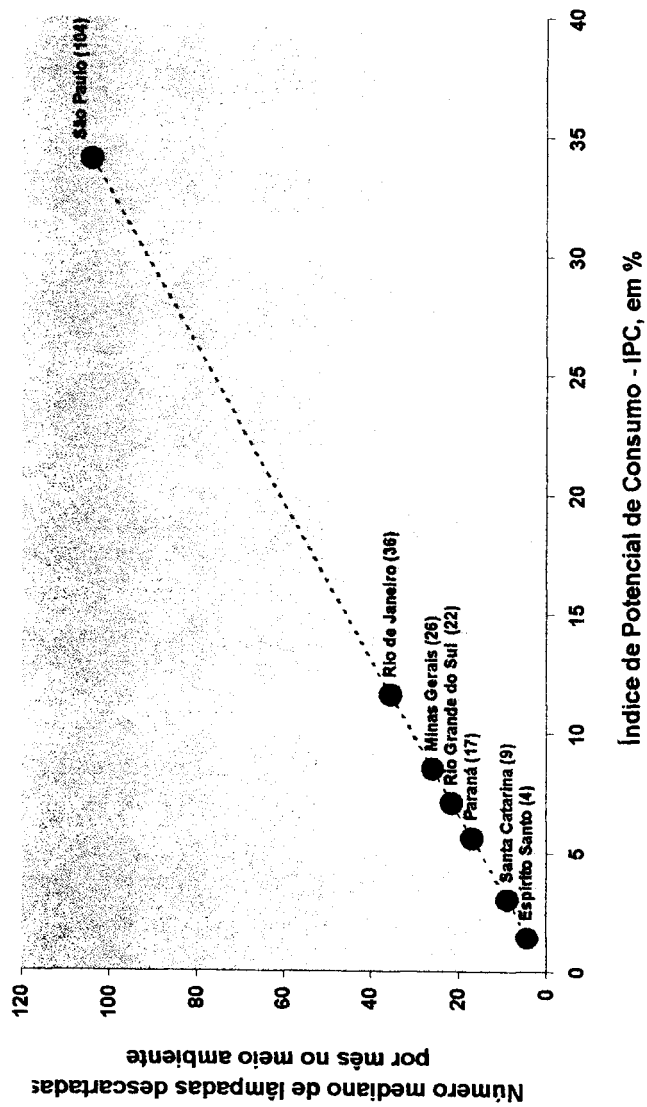


Figura 4.3 – Estimativa projetada para o número médio de descarte mensal de lâmpadas (fluorescente + HID) para diversos estados brasileiros, com base no descarte médio de empresas/órgãos públicos do Estado de Minas Gerais e nos IPC dos estados correspondentes.

4.1.2 – Estimativa de descarte na região sudeste do Brasil e em outros setores da economia brasileira

4.1.2.1 *Estimativa de descarte e mercúrio lançado ao meio ambiente na Região Sudeste*

A região sudeste do Brasil - região mais importante - possui sozinha o IPC acumulado de 55,649% (Gazeta Mercantil 1998). Devido à sua importância no contexto da economia nacional, procurou-se estimar o seu potencial de descarte e, conseqüentemente, o mercúrio lançado ao meio ambiente.

A partir dos dados sobre a produção anual brasileira de lâmpadas de mercúrio, de 48,5 milhões de unidades, e conteúdo médio de mercúrio por lâmpada, de 20,6 mg (Abilux 1998), IPC acumulado da Região Sudeste, de 55,649% e taxa de reciclagem de lâmpadas da ordem de 3% (Apliquim 1999), foi possível estabelecer os seguintes números:

■ descarte anual	26,990 milhões de unidades
■ mercúrio contido nesse descarte	556 kg
■ mercúrio liberado anualmente ao meio ambiente	539 kg

Percebe-se por esses números como a situação é séria e grave, principalmente se for considerada uma retrospectiva ao longo dos últimos 20 anos. Além do aporte de mercúrio ao meio ambiente, deve-se levar em conta a capacidade que este metal possui de se bioacumular e biomagnificar em ecossistemas. Deve-se enfatizar, ainda, que os números acima servem para uma reflexão, pois os parâmetros utilizados certamente foram muito mais críticos no passado. Por exemplo, a reciclagem de lâmpadas no Brasil, até há pouco tempo, era mera fantasia, e o conteúdo de mercúrio por lâmpada era bem mais elevado.

4.1.2.2 – *Estimativa de descarte em setores especiais*

Do estudo prospectivo realizado no Estado de Minas Gerais foram extraídos dois importantes parâmetros, que permitiram estabelecer projeções de descarte em dois setores de extrema importância na economia brasileira: setor de iluminação pública e setor da indústria de autoveículos. Os parâmetros extraídos da pesquisa são:

- descarte anual no setor de iluminação pública, representado por 350.000 lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio e vapor de sódio) e 20.000 lâmpadas fluorescentes, sob a responsabilidade da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig);

- descarte anual no setor da indústria de autoveículos, representado por 57.600 lâmpadas fluorescentes, efetuado pela Fiat Automóveis S. A.

Com base nestes parâmetros foram estimados os descartes nos setores supramencionados levando-se em consideração os seguintes atributos:

- GWh distribuído por concessionária de energia elétrica. No caso da Cemig, 34.869 GWh (Abradee 1999), o que dá uma relação anual de 10,04 lâmpadas de descarga/GWh e 0,57 lâmpadas fluorescentes/GWh. Essa taxa, para lâmpadas de descarga, é bem próxima à divulgada pela Celesc - empresa concessionária/distribuidora de energia elétrica do Estado de Santa Catarina - que é de 10,78 lâmpadas/GWh (115.000 lâmpadas por ano) (Eletricidade Moderna 1998). Para efeito meramente de avaliação foram consideradas as seguintes taxas: 0,57 para lâmpadas fluorescentes e 10,0 para lâmpadas de descarga.
- Área construída na indústria automobilística. No caso da Fiat, 562.000 m² (Anfavea 1998), o que representa uma taxa de descarte anual de 0,1025 lâmpadas fluorescentes/m². Para se ter uma idéia, nos EUA a taxa em edifícios comerciais é de 0,3571 lâmpadas fluorescentes/m², ou seja, 3,5 vezes maior (informações da Commercial Building Allocation in Usepa 1997a)

4.1.2.2.1 – Estimativa de descarte no setor de iluminação pública

No Brasil, os sistemas de iluminação de avenidas, ruas, estradas, túneis, praças, parques, praias, monumentos e construções de valor histórico, artístico e cultural estão sob a responsabilidade das prefeituras municipais. Por exemplo, a Riolut é a companhia pública responsável pela iluminação na cidade do Rio de Janeiro; a Eletropaulo é a companhia responsável pelo sistema de iluminação da cidade de São Paulo e a Cemig, responsável pela grande maioria dos sistemas de iluminação junto às prefeituras do Estado de Minas Gerais. Baseando-se nos dados da Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (Abradee), cujas empresas associadas (Figura 4.4) distribuem 85,9% de toda energia elétrica do nosso país, e nas condições de contorno supramencionadas, foi possível montar a Tabela 4.5 sobre uma estimativa de descarte de lâmpadas de mercúrio no setor de iluminação pública. Os quantitativos contabilizados são: 2.469.990 de lâmpadas de descarga e 140.780 de lâmpadas fluorescentes, totalizando 2.610.770 lâmpadas de mercúrio/ano. As principais empresas potencialmente geradoras de resíduos de lâmpadas de mercúrio são, em ordem decrescente: Eletropaulo, Cemig, Light, Bandeirantes (EBE) e CPFL.

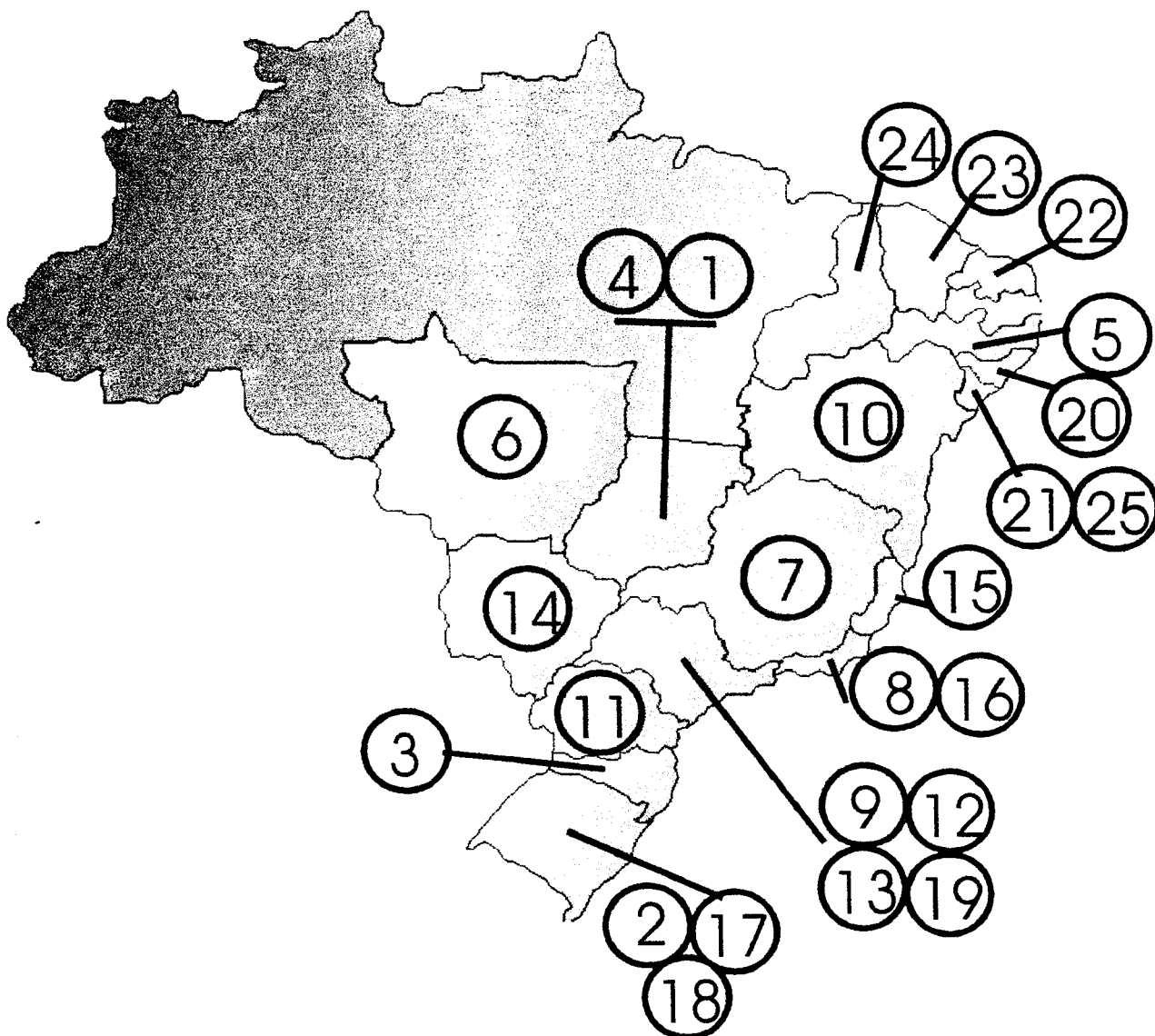


Figura 4.4 – Localização geográfica das empresas concessionárias de energia elétrica associadas à Abradec (1999).

1. CEB	6. CEMAT	11. COPEL	16. LIGHT	21. ENERGIPE
2. CEEE	7. CEMIG	12. CPFL	17. RGE	22. COSERN
3. CELESC	8. CERJ	13. ELETROPAULO	18. AES	23. COELCE
4. CELG	9. ELEKTRO	14. ENERSUL	19. EBE	24. CEPISA
5. CELPE	10. COELBA	15. ESCELSA	20. CEAL	25. SULGIPE

Tabela 4.5 – Estimativa de descarte de lâmpadas de mercúrio em empresas associadas à Abradee.

Companhias Associadas	Estado	Distribuição (GWh)	Descarte de lâmpadas/ano	
			Descarga	Fluorescentes
AES Sul	RS	6.453	64.530	3.678
Bandeirantes (EBE)	SP	22.869	228.690	13.035
CEAL	AL	1.796	17.960	1.023
CEB	DF	3.467	34.670	1.976
CEEE	RS	5.542	55.420	3.158
Celesc	SC	10.672	106.720	6.083
Celg	GO	5.865	58.650	3.343
Celpe	PE	6.965	69.650	3.970
Cemat	MT	2.752	27.520	1.568
Cemig	MG	34.869	348.690	19.875
Cepisa	PI	1.288	12.880	734
Cerj	RJ	6.831	68.310	3.893
Coelba	BA	8.918	89.180	5.083
Coelce	CE	5.339	53.390	3.043
Copel	PR	14.927	149.270	8.508
Cosern	RN	2.535	25.350	1.444
CPFL	SP	18.860	188.600	10.750
Elektro	SP	10.606	106.060	6.045
Eletropaulo	SP	35.754	357.540	20.379
Energipe	SE	1.651	16.510	941
Enersul	MS	2.753	27.530	1.569
Escelsa	ES	6.248	62.480	3.561
Light	RJ	24.801	248.010	14.136
RGE	RS	5.095	50.950	2.904
Sulgipe	SE	143	1.430	81
TOTAL Abradee			2.469.990	140.780

Base de dados: Abradee 1999

4.1.2.2.1 – Estimativa de descarte no setor da indústria de autoveículos

A indústria de autoveículos brasileira congrega empresas montadoras/fabricantes de automóveis de passeio, comerciais leves e pesados e máquinas agrícolas. Segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - Anfavea, 49,8% da indústria automobilística brasileira está concentrada na Região Sudeste. Daí a importância do levantamento do descarte de lâmpadas no setor, uma vez que tal região foi priorizada neste trabalho pelas razões já enumeradas. Com base nos atributos: (i) área construída e (ii) taxa de descarte da Fiat Automóveis (0,1025 lâmpadas fluorescentes/m²), foi possível construir a

Tabela 4.6. As montadoras com maior potencial de descarte são, em ordem decrescente: Volkswagen, General Motors, Ford, Mercedes-Benz e Fiat. Não foram estimados os descartes de novas fábricas e expansão das atuais: Renault e Volkswagen/Audi (PR), Mercedes-Benz (MG), Peugeot/Citröen (RJ), Land Rover/BMW, Toyota e GM (SP) e Guaíba (RS).

Tabela 4.6 – Estimativa de descarte de lâmpadas fluorescentes na indústria brasileira de autoveículos.

Montadora/Fabricante	Área construída (m ²)	Localização	Descarte (lâmpadas/ano)
Fiat Automóveis	562.000	Betim (MG)	57.600
AGCO	70.000	Canoas e Santa Rosa (RS)	7.175
Agrale	47.000	Caxias do Sul (RS)	4.818
Case	49.000	Sorocaba (SP)	5.023
Caterpillar	165.000	Piracicaba (SP)	16.913
Chrysler	25.000	Campo Largo (PR)	2.563
Fiat Allis	45.000	Contagem (MG)	4.613
Ford	717.000	São Paulo, Taubaté, Guarulhos e São Bernardo do Campo (SP)	73.493
General Motors	819.000	São Caetano do Sul e São José dos Campos (SP)	83.948
Honda	28.000	Sumaré (SP)	2.870
Karmann-Ghia	43.000	São Bernardo do Campo (SP)	4.408
Komatsu	55.000	Suzano (SP)	5.638
Mercedes-Benz	713.000	São Bernardo do Campo e Campinas (SP)	73.083
New Holland	71.000	Curitiba (PR)	7.278
Scania	130.000	São Bernardo do Campo (SP)	13.326
SLC – John Deere	100.000	Horizontina (RS)	10.250
Toyota	84.000	São Bernardo do Campo e Indaiatuba (SP)	8.610
Valtra	57.000	Mogi das Cruzes (SP)	5.843
Volkswagen	1.518.000	São Bernardo do Campo, Taubaté e São Carlos (SP) Resende (RJ)	155.595
Volvo	84.000	Curitiba (PR)	8.610
Yanmar	50.000	Indaiatuba (SP)	5.125
TOTAL (Anfavea)			556.782

* Base de dados: (Anfavea 1998)

4.1.2.2.3 – Estimativa de descarte com relação aos fabricantes de lâmpadas

Outro setor que merece atenção são os fabricantes de lâmpadas. Nesse setor, o descarte decorre da quebra e defeitos durante o processo de fabricação, que pode variar, dependendo do fabricante, de 2% a 5% (MRT 1999, Osram 2000). Se considerarmos o quantitativo anual de lâmpadas de mercúrio produzido no Brasil - 48,5 milhões de unidades (Abilux 1998) - tal perda seria, no mínimo, de 970.000 unidades. A destinação final dos resíduos provenientes dessas lâmpadas inservíveis é uma incógnita e precisa ser investigado pelos órgãos ambientais fiscalizadores.

4.1.2.2.4 – Outros setores potencialmente poluidores que merecem atenção

Outros setores de descarte que merecem atenção encontram-se relacionados a seguir:

- Telecomunicações.
- Petroquímico, química fina, refinarias e distribuidoras de combustíveis.
- Bancário.
- Ensino privado e público (universidades, faculdades e colégios).
- Autopeças.
- Forças Armadas e Polícia Militar.
- Órgãos públicos (municipal, estadual e federal).
- Centros industriais.

4.2 – CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

4.2.1 Constituintes de lâmpadas de mercúrio

Os constituintes em lâmpadas de mercúrio foram agrupados em cinco classes:

■ VIDRO

Os vidros são de três tipos:

- ◆ vidro soda (alcalino) - bulbo de lâmpada fluorescente;
- ◆ vidro soda (alcalino), com chumbo - bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio, e
- ◆ vidro sílica - tubo interno (*pellet*) de lâmpada a vapor de mercúrio.

Numa inspeção visual, percebe-se que o vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio apresenta coloração mais amarelada do que o vidro utilizado em lâmpadas fluorescentes. Essa cor mais intensa é indicativa da maior percentagem de Na_2O , conforme mostrado na Tabela 4.7. Esses vidros possuem diferentes composições químicas, pois são utilizados para diversas especificidades de uso; daí a menção de *composição aproximada*. O vidro sílica possui estrias, perceptíveis a olho nu, ao longo do tubo, o que facilita a sua identificação. Esse vidro pode ser facilmente confundido com o vidro tipo "vycor" (substituto mais barato, porém com temperatura de fusão abaixo de $1500\text{ }^\circ\text{C}$). Testes de chama realizados no Laboratório de Hialotécnica do Colégio Técnico da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) mostraram que esse tipo de vidro possui um brilho intenso, só atingindo o ponto de fusão em temperaturas acima de $1.700\text{ }^\circ\text{C}$. O vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio possui chumbo em sua composição, o que o diferencia dos demais vidros utilizados. O chumbo confere uma menor dilatação ao vidro, brilho mais intenso e um alto poder de refração da luz produzida. A difração de Raios X em amostras desse vidro mostrou que o constituinte principal é a sílica amorfa. As mesmas amostras, quando aquecidas a $1.100\text{ }^\circ\text{C}$, durante 2 horas, mostraram as presenças de mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e cristobalita ($\alpha\text{-SiO}_2$).

■ PÓ DE FÓSFORO

- Em lâmpadas fluorescentes

Normalmente, uma lâmpada padrão de 40 W tem cerca de 4 a 6 g de pó de fósforo. Esse pó é um fosfato de cálcio, sendo a fluorapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ a sua fase cristalina predominante. Foram identificadas, ainda, outras fases minoritárias: CaCO_3 – calcita; CaHPO_4 – monetita, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – brushita, TiO_2 – rutilo/anatásio e $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – whitlockita. A análise elementar aproximada desse pó encontra-se apresentada na Tabela 4.8. A sua composição química assemelha-se à composição da apatita sintética fabricada pela *Astimex Scientific Limited* (1999) e utilizada como padrão mineral em estudos de microanálise. Os elementos Mn e Sb presentes na matriz de fluorapatita funcionam como íons ativadores dos materiais fosforosos (Truesdale et al. 1993). Originalmente, o pó de fósforo é isento de mercúrio. Este metal é adicionado durante o processo de fabricação dos diversos tipos de lâmpadas de mercúrio.

- Em lâmpadas a vapor de mercúrio e outros tipos de lâmpadas de alta pressão

Geralmente, a fina camada que recobre a parte interna do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio (massa aproximada de 0,5 gramas por lâmpada de 400 W) é constituída de

Tabela 4.7 – Composição aproximada de vidros utilizados em lâmpadas de mercúrio.

Tipo de Lâmpada	Composição aproximada (% em massa)									Tipo de Vidro
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	PbO		
Fluorescente	69,2 ± 1,4	3,1 ± 0,2	1,8 ± 0,1	16,5 ± 0,5	4,2 ± 0,2	1,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1	<0,1		Vidro soda
Vapor de Hg – tubo externo	71,0 ± 1,4	8,8 ± 0,3	0,7 ± 0,1	12,4 ± 0,4	<0,1	<0,1	1,3 ± 0,1	4,8 ± 0,2		Vidro soda
Vapor de Hg – tubo interno	96,8 ± 1,9	ND	ND	1,4 ± 0,1	ND	ND	0,7 ± 0,1	ND		Vidro sílica

Nota:

1) Métodos analíticos utilizados: Gravimetria (SiO₂); ICP-AES (Pb); Absorção atômica – AAS (demais elementos), ND – Não detectado.

Tabela 4.8 – Análise elementar aproximada de pó de fósforo utilizado em lâmpadas de mercúrio.

Elemento	Pó de fósforo	
	Lâmpada fluorescente 40 W	Lâmpada a vapor de mercúrio de 400 W
	Concentração em (% em massa) ou $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	
Ca	$(37,91 \pm 0,11)\%$	$(900 \pm 45) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
P	$(18,12 \pm 0,36)\%$	$(6,1 \pm 0,2)\%$
F	$(2,95 \pm 0,14)\%$	$(1,5 \pm 0,1)\%$
Mn	$(0,86 \pm 0,02)\%$	$(20 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Cl	$(0,72 \pm 0,04)\%$	ND
Sb	$(0,61 \pm 0,01)\%$	$(200 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Fe	$(0,19 \pm 0,01)\%$	ND
Cd	$(0,18 \pm 0,01)\%$	$(11 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Al	$(580 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(1,48 \pm 0,12)\%$
Ba	$(310 \pm 15) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(28 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Mg	$(143 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(165 \pm 5) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Sr	$(125 \pm 7) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(19,2 \pm 0,9) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ni	$(90 \pm 4) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(335 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Pb	$(38 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(0,60 \pm 0,03)\%$
Cr	$(10 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(65 \pm 5) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Zn	$(7 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(32 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Co	$(4 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(6 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
La	$(35 \pm 4) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(38 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Nd	$(31 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(10 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ce	$(12 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(27 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Sm	$(6 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(180 \pm 9) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Dy	$(3 \pm 0,3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(25 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Er	$(3 \pm 0,3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(54 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ho	$(2 \pm 0,2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(15 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Eu	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(2,78 \pm 0,04)\%$
Y	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(34,3 \pm 0,3)\%$
Yb	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(200 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
V	NA	$(1,66 \pm 0,10)\%$

Nota:

- 1) Métodos de análise: Colorimetria (P); Potenciometria (F e Cl); Espectrometria de fluorescência de Raios X (V); ICP/AES (demais elementos); ND - Não detectado; NA - Não analisado.
- 2) A composição química do pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes se assemelha à da apatita sintética fabricada pela Astimex, utilizada como padrão em estudos de microanálise (Ca - 39,74%; O - 38,07%; P - 18,42%; F - 3,77%).

fosfato e vanadato de terras raras, cujas fases cristalinas predominantes são representadas pela xenotima (YPO_4) e wakefieldita (YVO_4), respectivamente. Na Tabela 4.8 é apresentada também a análise elementar aproximada desse pó de fósforo. O que chama a atenção neste material são as concentrações de ítrio e európio (*red phosphors*), demais elementos do subgrupo do ítrio (Sm-Ho), V e Pb.

Em lâmpadas a vapor de sódio (modelo Lu – 400W) e multivapores (modelo HQI – 400W), a fase cristalina predominante é um pirofosfato de zinco, mais precisamente um tetrahidrogênio dipirofosfato dihidratado de diamônio e zinco – $(\text{NH}_4)_2\text{ZnH}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e, subordinadamente, a CaHPO_4 – monetita.

Em lâmpadas mistas (modelos HWL – 160 e 250W) a fase cristalina identificada é a xenotima.

■ COMPONENTES DIVERSOS (MISCELÂNEA)

• Terminais e Bases

Os terminais em lâmpadas fluorescentes são constituídos por uma liga de alumínio-magnésio, com ampla predominância do Al sobre o Mg; as bases das lâmpadas a vapor de mercúrio (soquete) são de bronze ou liga de ferro-níquel (análises por difração de Raios X).

• Pinos de lâmpadas fluorescentes

São, predominantemente, de latão (liga de cobre e zinco).

• Material cimentante encontrado na base das lâmpadas

O material cimentante/selante encontrado na base de lâmpadas fluorescentes, nas cores vermelha e verde, apresenta como fases cristalinas: calcita - CaCO_3 , dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e quartzo - SiO_2 . As análises por via úmida (gravimetria) e espectrometria de absorção atômica mostraram a seguinte composição química (% em massa): CaO ($48,7 \pm 0,9$), MgO ($32,5 \pm 0,6$), SiO_2 ($12,6 \pm 0,3$) e PbO ($1,9 \pm 0,1$).

Em lâmpadas a vapor de mercúrio, o material cimentante é encontrado sob duas formas:

- ♦ material escuro, vitrificado e amorfo. Após a calcinação a uma temperatura de, aproximadamente, 900°C , este material continuou amorfo, isto é, sem formação de fase(s) cristalina(s). As análises por via úmida (gravimetria) e espectrometria de absorção atômica mostraram a seguinte composição química aproximada (% em massa): SiO_2 ($65,5 \pm 1,3$), Na_2O ($13,4 \pm 0,3$), CaO ($7,5 \pm 0,2$), Al_2O_3 ($2,2 \pm 0,1$), K_2O ($0,83 \pm 0,04$) e MgO ($0,35 \pm 0,02$).

- ♦ material claro: quartzo (predominante) e mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). As análises por via úmida (gravimetria) e espectrometria de absorção atômica mostraram a seguinte composição química (% em massa): SiO_2 ($78,1 \pm 1,5$), Al_2O_3 ($14,2 \pm 0,3$), K_2O ($2,32 \pm 0,11$) Na_2O ($0,32 \pm 0,02$) e MgO ($0,13 \pm 0,01$).

- Material isolante

O material isolante em lâmpadas fluorescentes é de constituição baquelítica (resina sintética, obtida pela condensação de fenóis com aldeído fórmico).

- Filamentos

Os filamentos de lâmpadas fluorescentes são constituídos de platina, tungstênio, ósmio e tântalo. O filamento identificado neste trabalho, por difração de Raios X, é à base de tungstênio elementar (W).

- Poeiras emissoras de elétrons

Foram identificados, por difração de Raios X, os seguintes óxidos alcalinos terrosos: tungstato de bário e cálcio - Ba_2CaWO_6 , carbonato de bário - BaCO_3 , denominado de witherita e $\text{Ba}_5\text{CaW}_2\text{O}_{12}$.

- Eletrodos

Geralmente são de tungstênio, níquel, cobre e/ou ferro. Os mais utilizados em lâmpadas a vapor de mercúrio são de tungstênio (W) e de ferro cromado - $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$ (aço inox), enquanto em lâmpadas fluorescentes, o de ferro cromado.

- Suporte interno e fio condutor

Geralmente estes suportes internos em lâmpadas a vapor de mercúrio são de ferro níquelado ou aço inox. O fio condutor de energia, determinado por difração de raios X, é de óxido de cobre - Cu_2O (cuprita).

- Resistor de partida

Os resistores encontrados em lâmpadas a vapor de mercúrio, de 400 W de potência, são de cobre e possuem resistência variando de 18 a 20 $\text{k}\Omega$. Tais resistores são utilizados para limitar a corrente que flui para o eletrodo de partida.

- Soldas

A difração de Raios X conseguiu identificar que o material utilizado na base de uma lâmpada a vapor de mercúrio é constituído, basicamente, por uma liga de chumbo (predominante) e AgF.

■ MERCÚRIO

O conteúdo de mercúrio em uma lâmpada depende, basicamente, do tipo de lâmpada, modelo, ano e fabricante. Informações de fabricantes de lâmpadas dos EUA indicam que substancial redução no conteúdo de mercúrio foi conseguida a partir da década de 90 e que maiores reduções poderiam ocorrer nas próximas décadas (Usepa 1997a).

● Mercúrio em lâmpadas fluorescentes

Segundo dados apresentados pela Usepa, existe uma previsão de que no período de 1997 – 2007 o conteúdo de mercúrio seja de 21,000 mg (Usepa 1997a) em uma lâmpada fluorescente de 40W, diâmetro de 1½”, caracterizada como T12. Dados apresentados pela Nema em trabalho conjunto realizado com a Sylvania (fabricante de lâmpadas), indicam que, provavelmente, 0,2% (0,042 mg) do conteúdo total de mercúrio em uma lâmpada fluorescente usada/queimada esteja sob a forma de mercúrio elementar (vapor), e o restante de 99,8% (20,958 mg) sob a forma de mercúrio divalente (Usepa 1997a), (Tabela 2.3). Entretanto, a especiação do mercúrio no pó de fósforo (matriz sólida) é, ainda, um assunto controvertido e complexo (Usepa 1998d).

Estudos recentes utilizando a técnica de *X-Ray Photoelectron Spectroscopy* (XPS) mostram que existe uma forte interação do mercúrio com o Na (presente no tubo de vidro), com componentes emissores de elétrons, em particular Ba e Sr, e com o Sn (presente em filmes condutores), formando com estes compostos intermetálicos (Dang et al. 1999).

● Mercúrio em lâmpadas a vapor de mercúrio e a vapor de sódio

O mercúrio em lâmpadas HID está concentrado na sua parte interna, mais precisamente, no tubo interno (*pellet*), sob a forma líquida (mercúrio elementar), e o seu conteúdo depende da potência (wattagem), variando de 16 mg em uma lâmpada de 75 W a 185 mg em uma lâmpada de 1000 W (Nema 1994). Em lâmpadas a vapor de sódio, o mercúrio está sob a forma de amálgama Hg-Na, e o conteúdo varia de 16 mg de mercúrio, para uma lâmpada de 50 W, a 31 mg para uma lâmpada de 1000 W (Truesdale et al. 1993, Nema 1994, Battye et al. 1994).

● Análises realizadas

Os estudos para a caracterização dos resíduos de lâmpadas foram concentrados em lâmpadas fluorescentes fabricadas no Brasil e EUA, novas e usadas/queimadas e de diversos modelos. As lâmpadas a vapor de mercúrio não foram objeto de análise devido às dificuldades encontradas para se obter uma amostra representativa, pois o mercúrio existente nessas lâmpadas está confinado nos *pellets* de vidro sílica, que são extremamente duros e difíceis de

serem quebrados sem que haja perda de massa desse metal. Assim sendo, as análises ficaram restritas à determinação do mercúrio total no pó de fósforo, no resíduo bruto e na lúxívia de resíduos de lâmpadas fluorescentes. Adicionalmente, foram feitas análises intercomparativas utilizando-se diferentes laboratórios e métodos analíticos.

- Análises de mercúrio em pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes

Na Tabela 4.9 encontram-se os resultados da concentração de Hg em pó de fósforo (matriz sólida). A amostra LF 40/01 foi analisada em dois laboratórios distintos (CDTN e Limnos Hidrobiologia e Limnologia Ltda., em Belo Horizonte), utilizando-se a espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio (CV-AAS), o que permitiu a comparação de resultados. Além disso, em alguns casos, a mesma amostra foi analisada por outra técnica analítica (ko-ativação neutrônica paramétrica), o que também, propiciou a intercomparação entre diferentes técnicas analíticas. O resultado analítico obtido para a amostra LF 40/01, valor médio de $4.210 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Hg, é da mesma ordem de grandeza do valor encontrado por Truesdale T. et al. (1993), ou seja $4.700 \mu\text{g.g}^{-1}$. No que se refere à comparação de laboratórios, a diferença constatada é menor do que 10%. Os resultados analíticos encontrados para as amostras LF 40/02 e LF 40/03 são bem diferentes daqueles da amostra LF 40/01, apesar de as amostras serem procedentes do mesmo tipo de lâmpada e fabricante. Isto mostra a variabilidade existente na concentração de mercúrio de um mesmo modelo de lâmpada.

■ OUTROS METAIS PESADOS

Além do mercúrio, os metais pesados que podem conferir periculosidade aos resíduos de lâmpadas de mercúrio são: (a) cádmio – existente no pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes e (b) chumbo – existente em soldas e no vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio.

O cádmio, concentrado no pó de fósforo, foi dosado por dois métodos analíticos diferentes, ambos apresentando uma excelente aproximação de valores de concentração: duas amostras por espectrometria de fluorescência de Raios X: $(0,18 \pm 0,01)\%$ e $(0,19 \pm 0,01)\%$, e por espectrometria de energia de Raios X: $(0,14 \pm 0,01)\%$ e $(0,22 \pm 0,01)\%$, respectivamente.

As análises preliminares realizadas com amostras de vidro do bulbo externo de lâmpadas de alta intensidade, por espectrometria de energia de Raios X, revelaram os seguintes valores de óxido de chumbo (PbO): $< 0,01\%$, em lâmpadas fluorescentes, multivapores metálicos e mista, $(0,10 \pm 0,01)\%$ em lâmpadas a vapor de sódio, e $(4,5 \pm 0,2)\%$ e $(4,8 \pm 0,2)\%$, essa última por ICP-AES, em lâmpadas a vapor de mercúrio.

4.2.2 - Classificação dos resíduos

4.2.2.1 - Análises de mercúrio em resíduos de lâmpadas fluorescentes

Estudos apresentados pela Nema (1994) apontam que cerca de 99,8% do mercúrio contido em uma lâmpada fluorescente usada/queimada está concentrado no pó de fósforo (aproximadamente 2% da massa total de uma lâmpada), que representa o material potencialmente perigoso neste tipo de lâmpada. Levando-se em consideração estes estudos e em virtude da complexidade da natureza física do resíduo gerado e grande dificuldade de se coletar uma amostra representativa desse resíduo, o presente trabalho foi conduzido de duas formas: (i) análise da mistura de vidro + pó de fósforo e (ii) análise somente do pó de fósforo.

Na Tabela 4.10 encontram-se apresentados os resultados de mercúrio total em resíduos de lâmpadas (mistura de vidro + pó de fósforo). Comparando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, verifica-se que existe uma certa coerência entre as concentrações de mercúrio no pó de fósforo e na massa bruta. Para as amostras LF 40/02 e LF 40/03, o fator de diluição é praticamente o mesmo (168 vezes); já para a amostra LF 40/01, esse fator é da ordem de 66 vezes, o que mostra, mais uma vez, a variabilidade existente.

4.2.2.2 – Testes de lixiviação e determinação de mercúrio na massa bruta do resíduo

As análises em lixívia de resíduos de lâmpadas fluorescentes foram realizadas objetivando classificar os ditos resíduos de acordo com a Norma ABNT NBR 10.004 – Classificação de Resíduos Sólidos (1987a). O procedimento adotado para a lixiviação desses resíduos obedeceu à Norma ABNT NBR 10.005 – Lixiviação de Resíduos (1987b).

Os resultados analíticos apresentados na Tabela 4.11, para as amostras LF 40/05 e LF 40/06, foram obtidos utilizando-se técnicas e laboratórios diferentes.

Considerando as datas de análises, percebe-se, para cada amostra, uma nítida redução na concentração de mercúrio ao longo do tempo, uma vez que as análises não foram processadas simultaneamente, nos diferentes laboratórios por razões operacionais (o ideal seria na mesma data). Esta redução poderia ser creditada, em grande parte, à absorção do mercúrio pelo plástico dos frascos de acondicionamento das amostras (o frasco mais indicado seria o de teflon). Os valores encontrados para as concentrações de mercúrio, nos testes de lixiviação, estão abaixo do limite regulatório, previsto no Anexo G – Listagem nº 7 da Norma NBR 10.004, que é de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$.

No entanto, esses resultados foram considerados inconclusivos, pois estudos conduzidos pela Usep (1997, 1998e), no início da década de 90, mostram que a maioria das lâmpadas usadas/queimadas excedem o limite regulatório para o mercúrio ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$, que

Tabela 4.9 – Concentração de mercúrio em matriz de pó de fósforo de lâmpada fluorescente de 40 W.

Data	Amostra	Tipo de Matriz	Técnica Analítica	Concentração ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Laboratório
30/03/1999	LF 01	sólida	Absorção Atômica (CV-AAS)	(4.131 ± 20)	Limnos
03/04/2000	LF 01	sólida	Absorção Atômica (CV-AAS)	(4.400 ± 100)	CDTN
12/04/2000	LF 01	sólida	Ativação Neutrônica	(4.100 ± 70)	CDTN
12/04/2000	LF 02	sólida	Ativação Neutrônica	(1.010 ± 40)	CDTN
03/04/2000	LF 03	sólida	Absorção Atômica (CV-AAS)	(2.480 ± 70)	CDTN

Tabela 4.10 – Concentração de mercúrio na massa bruta de resíduos de lâmpadas fluorescentes de 40 W.

Data	Amostra	Tipo de Matriz	Técnica Analítica	Concentração ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Laboratório
03/04/2000	LF 40/01	sólida	Absorção Atômica (CV-AAS)	64 ± 3	CDTN
10/05/2000	LF 40/02	sólida	Ativação Neutrônica	6 ± 1	CDTN
10/05/2000	LF 40/03	sólida	Ativação Neutrônica	15 ± 1	CDTN

Nota:

Procedimento de análise: SM -3500-Hg Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Pollution and Health Association - APHA, 1995).

Tabela 4.11 – Testes de lixiviação em resíduos de lâmpadas fluorescentes

Parâmetro analisado: mercúrio total em lixívia.

Data	Amostra	Tipo de Matriz	Técnica Analítica	Concentração (mg.L^{-1})	Laboratório
25/02/2000	LF40/05	líquida	Absorção Atômica (CV-AAS)	$(0,065 \pm 0,001)$	Limnos
25/02/2000	LF40/06	líquida	Absorção Atômica (CV-AAS)	$(0,039 \pm 0,001)$	Limnos
03/04/2000	LF40/05	líquida	Absorção Atômica (CV-AAS)	$(0,041 \pm 0,001)$	CDTN
03/04/2000	LF40/06	líquida	Absorção Atômica (CV-AAS)	$(0,021 \pm 0,001)$	CDTN
10/05/2000	LF40/05	líquida	Ativação Neutrônica	$(0,030 \pm 0,001)$	CDTN
10/05/2000	LF40/06	líquida	Ativação Neutrônica	$(0,020 \pm 0,005)$	CDTN

representa o dobro do limite regulatório brasileiro), quando submetidas aos testes TCLP⁶ (procedimento análogo ao teste de lixiviação adotado no Brasil para caracterização de resíduos sólidos). Os estudos apresentados pela Usepa mostram uma grande variabilidade nos resultados analíticos e o quanto é difícil caracterizar este tipo de resíduo devido: (1) conteúdo variável de mercúrio de uma lâmpada para outra, (2) erros associados à amostragem, e (3) aplicabilidade do método TCLP para o mercúrio, principalmente no que diz respeito à filtragem do resíduo (Usepa 1998b, 1998e).

Face às dificuldades apontadas e devido à singularidade do resíduo, o estudo foi redirecionado, concentrando-se a pesquisa somente no pó de fósforo, ou seja, no material potencialmente perigoso. Este procedimento diminuiu os erros associados à amostragem e filtragem. Para tal, foi adotado um procedimento para a caracterização do resíduo de lâmpada fluorescente, diferentemente ao estabelecido pela Norma ABNT NBR 10.005 (Teste de Lixiviação) e Anexo G – Listagem n° 7 da Norma NBR 10.004, passando tal enquadramento a ser feito comparando-se os resultados analíticos ao limite regulatório estabelecido no Anexo I – Listagem n° 9, da Norma ABNT - NBR 10.004, que é de no máximo 100 mg de Hg /kg de massa bruta de resíduo. As concentrações de mercúrio foram determinadas na massa bruta do pó de fósforo (aproximadamente 2% da massa total da lâmpada) e, em seguida, os valores foram ajustados à massa total de cada lâmpada. As condições de contorno adotadas foram: (1) que o mercúrio estivesse, na sua quase totalidade, concentrado no pó de fósforo e (2) que este pó tivesse sido, originalmente depositado eletrostaticamente de maneira uniforme em toda a lâmpada na razão de 4,5 mg.cm⁻², conforme dado apresentado pela Osram (Osram 2000). Na Tabela 4.12 encontram-se relacionadas as análises realizadas em 15 amostras (LF 40/07 a LF 40/21), envolvendo lâmpadas novas e usadas/queimadas, diferentes modelos, fabricantes e procedências (nacional e importadas dos EUA). As considerações a serem observadas são as seguintes:

- as concentrações de mercúrio total na matriz do pó de fósforo de lâmpadas usadas/queimadas são, normalmente, maiores do que na matriz de lâmpadas novas;
- os resultados analíticos mostram que as concentrações e conteúdos de mercúrio total variam de um modelo de lâmpada para outro:

⁶ Testes TCLP (lixiviação de resíduos) em duas amostras de lâmpadas fluorescentes. uma circular de 32 W da Westinghouse e outra da Sylvania, modelo Day Light de 40 W, mostraram os seguintes resultados: 0.75 mg.L⁻¹ e 0.86 mg.L⁻¹, respectivamente. Esses resultados estão bem acima do limite regulatório norte-americano, que é de 0.2 mg.L⁻¹ (Usepa 1998e).

Tabela 4.12 - Classificação dos resíduos de lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W, conforme Norma ABNT - NBR 10.004

Parâmetro analisado: mercúrio total em matriz sólida.

Amostra (Nº)	Modelo de lâmpada	Dimensões		Concentração de Hg		Massa			Conteúdo de Hg por massa bruta do resíduo (mg.kg ⁻¹)	Enquadramento do resíduo	Classificação do resíduo analisado	
		C	φ _{int}	cm	Pó de fósforo (g)	Hg no pó (mg)	Lâmpada (kg)	Pó de fósforo (µg.g ⁻¹)				no pó de fósforo (µg.g ⁻¹)
LF40/07	Daylight	118	3,61		3,720 ± 170	6,02	22,39	0,279	80,27	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/08	Daylight	118	3,61		4.850 ± 180	6,02	29,20	0,280	104,28	Acima do Limite	Perigoso - Classe I	
LF40/09	LD	118	3,59		3.500 ± 400	5,99	20,97	0,287	73,07	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/10	SLD	118	3,60		6.200 ± 600	6,00	37,20	0,288	129,17	Acima do Limite	Perigoso Classe I	
LF40/11	LDP	118	3,63		4.000 ± 400	6,06	24,24	0,281	86,26	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/12	LDP	118	3,60		820 ± 80	6,01	4,93	0,284	17,35	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/13	LDP	118	3,62		8.900 ± 900	6,04	53,76	0,278	193,37	Acima do Limite	Perigoso - Classe I	
LF40/14	ELD	117	3,23		6.300 ± 600	5,34	33,64	0,246	136,76	Acima do Limite	Perigoso - Classe I	
LF40/15	LDE	118	3,61		6.700 ± 700	6,02	40,33	0,281	143,54	Acima do Limite	Perigoso - Classe I	
LF40/16	LDE	118	3,61		13.300 ± 1.300	6,02	80,07	0,292	274,20	Acima do Limite	Perigoso - Classe I	
LF40/17	ELD	118	3,63		3.600 ± 400	6,06	21,82	0,274	79,62	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/18	SLD	118	3,62		750 ± 80	6,04	4,53	0,293	15,46	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/19	SLD	118	3,63		760 ± 80	6,06	4,61	0,294	15,67	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/20	LDE	118	3,20		370 ± 40	5,34	1,98	0,256	7,72	Abaixo do Limite	Não-perigoso	
LF40/21	LDE	118	3,21		330 ± 30	5,35	1,77	0,255	6,94	Abaixo do Limite	Não-perigoso	

Notas:

- 1) SLD (super luz do dia); LD (luz do dia); LDP (luz do dia plus); ELD (extra luz do dia); LDE (luz do dia especial).
- 2) C = comprimento (somente o tubo de vidro); φ_{int} = diâmetro interno do tubo.
- 3) Deposição eletrostática de pó de fosfato de cálcio de 4,5 mg.cm² em cada lâmpada, conforme dado fornecido pela Osram do Brasil.
- 4) As amostras LF40/07 e LF40/08 referem-se a lâmpadas fabricadas nos EUA; LF40/09 a LF40/21, fabricadas no Brasil.
- 5) As lâmpadas usadas/queimadas apresentam escurecimento nas suas extremidades.
- 6) Amostras LF40/07 a LF40/17: lâmpadas usadas/queimadas; amostras LF40/18 a LF40/21: lâmpadas novas.
- 7) Método de análise de mercúrio: CV-AAS (Absorção Atômica com geração de vapor frio); limite de detecção: 0,100 µg.g⁻¹.
- 8) Limite regulatório para o mercúrio: 100 mg de Hg/kg de massa bruta de resíduo, conforme Anexo I - Listagem nº 9, Norma ABNT NBR 10.004.

- mínimos de (330 ± 30) μg de Hg por g de pó de fósforo e 6,94 mg de Hg por kg de resíduo total, respectivamente, para uma lâmpada nova. As análises em suporte de lâmpadas novas mostram que as concentrações de mercúrio total estão limitadas, por exemplo, a $760 \mu\text{g.g}^{-1}$, e

- máximos de (13.300 ± 1.300) $\mu\text{g.g}^{-1}$ e $274,20 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente, para uma lâmpada usada/queimada;

- os resíduos de lâmpadas usadas/queimadas exibem, em alguns casos, concentrações de mercúrio total que excedem o limite regulatório brasileiro como, por exemplo, os resíduos representados pelas amostras LF40/08, LF40/10 e LF40/13 a LF40/16;
- numa análise de sensibilidade, mesmo considerando-se que o conteúdo de pó de fósforo (razão da deposição eletrostática) esteja superestimado, alguns resíduos de lâmpadas ainda continuarão sendo classificados como perigosos, porque seus conteúdos de mercúrio estão muito além do limite regulatório;
- Resíduos com tais características devem ser classificados, conforme a Norma ABNT NBR 10.004, como resíduos perigosos – Classe I. Devem ser classificados, indistintamente, como perigosos, porque seria quase que impossível, devido a incerteza, separar, aleatoriamente, no meio de um descarte ou de um lote qualquer, as lâmpadas com concentrações de mercúrio abaixo do limite regulatório, daquelas que estão acima desse limite. Quanto ao procedimento aqui sugerido, seria interessante lembrar que a legislação dos EUA caracteriza como perigosos os resíduos que exibem esta tendência ambígua, ou seja, tendência de um mesmo tipo de resíduo, com constituinte tóxico e/ou perigoso, em concentrações ora acima do limite regulatório, ora abaixo desse limite (Usepa 1998b).

Os resultados analíticos mostraram que o resíduo proveniente de lâmpada com diâmetro de $1\frac{1}{4}$ " (T10), amostra LF 40/14, com concentração de mercúrio de (6.300 ± 600) $\mu\text{g.g}^{-1}$ é, também, um resíduo perigoso, a exemplo de alguns resíduos provenientes de lâmpadas com diâmetro de $1\frac{1}{2}$ " (T12). Isto indica que a redução no diâmetro de T12 para T10 por si só não é suficiente para que os diversos resíduos gerados possam mudar de classe de periculosidade. As concentrações originais de mercúrio, no processo de fabricação desses dois tipos de lâmpadas devem ser iguais ou muito próximas. Obviamente, o que varia é o conteúdo de mercúrio em cada tipo de lâmpada.

4.2.2.3 – Testes de lixiviação e solubilização para cádmio e chumbo

Na Tabela 4.13 encontram-se relacionados os resultados analíticos de testes de lixiviação e solubilização para o cádmio em resíduos provenientes de lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W. Os testes de lixiviação mostraram que as concentrações de cádmio de $(0,259 \pm 0,003)$ mg.L⁻¹ e $(0,337 \pm 0,001)$ mg.L⁻¹ estão abaixo do limite previsto no Anexo G, Listagem n° 7, Norma ABNT NBR 10.004, que é de 0,500 mg.L⁻¹. Por esta Norma, estes resíduos não podem ser classificados como perigosos e foram, então, submetidos a testes de solubilização para diferenciação das classes de resíduos (Classe II - não-inerte ou Classe III - inerte). Os testes de solubilização, conforme Norma ABNT NBR 10.006, mostraram que as concentrações desse metal de $(0,002 \pm 0,001)$ mg.L⁻¹ e $(0,003 \pm 0,001)$ mg.L⁻¹ estão abaixo do limite regulatório previsto no Anexo H, Listagem n° 8, Norma ABNT NBR 10.004, que é de 0,005 mg.L⁻¹. Por essa Norma, os resíduos com constituinte solubilizado em concentrações abaixo do limite regulatório devem ser classificados como resíduos Classe III – inertes.

Quanto ao chumbo, os testes de lixiviação foram concentrados no vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio de 400 W, o qual representa, aproximadamente, 70% da massa total da lâmpada. Em seguida, foi feito um ajuste nos resultados obtidos para a massa total da lâmpada (Tabela 4.14). Quatro em cinco amostras analisadas apresentaram valores que excedem o limite regulatório brasileiro, que é de 5,0 mg.L⁻¹ (Anexo G – Listagem n° 7, Norma ABNT NBR 10.004). A concentração mais elevada de chumbo – 16,39 mg.L⁻¹ foi encontrada na amostra VM 05. As amostras VM 02 e VM 03 referem-se ao mesmo modelo e mesmo fabricante, porém com valores acima e abaixo do limite regulatório, respectivamente. Isto mostra que existe não só uma variabilidade na qualidade dos vidros empregados na fabricação das referidas lâmpadas (concentração de chumbo), como, também, de um lote para outro, ainda que provenientes de um mesmo fabricante. A lâmpada procedente dos EUA apresentou, também, concentração de chumbo acima do limite regulatório brasileiro. Pelos testes de lixiviação apresentados, os resíduos de lâmpadas a vapor de mercúrio devem ser classificados, de acordo com a Norma ABNT NBR 10.004, como resíduos perigosos – Classe I para o chumbo, caracterizados como tóxicos (TL) e código de identificação D008. Analogamente, como comentado no caso dos resíduos de lâmpadas fluorescentes, seria impossível, devido à incerteza, separar ao acaso, no meio de um lote qualquer, as lâmpadas com concentrações de chumbo abaixo do limite regulatório, daquelas que estão acima desse limite.

Tabela 4.13 – Testes de lixiviação e solubilização em resíduos de lâmpadas fluorescentes de 40 W
Parâmetro analisado: cádmio.

Data	Amostra	Concentração (mg.L ⁻¹)	Teste	Classificação do resíduo Norma ABNT NBR 10.004
25/02/2000	LF40/05	(0,259 ± 0,003)	Lixiviação	Resíduo classe II ou III
25/02/2000	LF40/06	(0,337 ± 0,001)	Lixiviação	Resíduo classe II ou III
16/10/2000	LF40/22	(0,002 ± 0,001)	Solubilização	Resíduo classe III - Inerte
16/10/2000	LF40/23	(0,003 ± 0,001)	Solubilização	Resíduo classe III - Inerte

Notas:

- 1) Testes de Lixiviação e Solubilização de resíduos, conforme Normas ABNT NBR 10.005 e ABNT NBR 10.006, respectivamente.
- 2) Limite regulatório para o Cd em Teste de Lixiviação: 0,5 mg.L⁻¹, Anexo G – Listagem n° 7, ABNT NBR 10.004.
- 3) Limite máximo no extrato obtido no Teste de Solubilização para o Cd: 0,005 mg.L⁻¹, Anexo H – Listagem n° 8, ABNT NBR 10.004.
- 4) Método analítico utilizado: Espectrometria por Absorção Atômica (AAS); limite de detecção: 0,001 mg.L⁻¹.

Tabela 4.14 - Classificação dos resíduos de lâmpadas a vapor de mercúrio, conforme Norma ABNT - NBR 10.004

Parâmetro analisado: chumbo.

Amostra	Modelo de lâmpada	Teste de Lixiviação Concentração de Pb (mg.L ⁻¹)	pH no teste		Massa de vidro do bulbo externo - mv (kg)	Massa total da lâmpada - mt (kg)	mv/mt (%)	Ajuste no resultado Teste de Lixiviação (mg.L ⁻¹)	Enquadramento do resíduo	Classificação do resíduo analisado
			Inicial	Final						
	①	②	③		④	⑤	④ : ⑤ = ⑥	② x ⑥ = ⑦		
VM 01	DX, EUA	11,44 ± 0,04	9,21	4,81	0,178	0,250	71,2	8,12	Acima do limite Regulatório	Perigoso
VM 02	HQL 400	9,76 ± 0,01	9,18	6,17	0,169	0,242	69,8	6,78	Acima do limite Regulatório	Perigoso
VM 03	HQL 400	5,89 ± 0,03	8,72	4,92	0,171	0,244	70,1	4,13	Abaixo do limite Regulatório	Não-perigoso
VM 04	VM 400	18,30 ± 0,04	8,54	5,08	0,153	0,240	63,8	11,68	Acima do limite Regulatório	Perigoso
VM 05	HPL 400	25,37 ± 0,05	8,96	5,00	0,164	0,254	64,6	16,39	Acima do limite Regulatório	Perigoso

Notas:

- 1) Vidro analisado: bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio de 400 W de potência.
- 2) Todas as amostras são provenientes de lâmpadas usadas/queimadas, inservíveis, de fabricação nacional, com exceção da amostra VM 01, que é fabricada nos EUA.
- 3) Teste de Lixiviação: conforme ABNT NBR 10.005.
- 4) Limite regulatório para o chumbo em resíduos: 5 mg.L⁻¹, conforme Anexo G - Listagem nº 7, ABNT NBR 10.004.
- 5) Método de análise utilizado: Absorção Atômica (AAS), Procedimento de referência: SM 3.500 - Pb (APHA et al. 1995).

4.2.3 - Análise do ciclo de vida de lâmpadas de mercúrio

No âmbito da ISO Série 14.000, a análise do ciclo de vida dos produtos figura no nível de Rotulagem Ambiental, Comitê Técnico 207, Subcomitê SC5. Para cada categoria de produto, devem ser estabelecidos critérios com base numa análise “do berço ao túmulo” do desempenho ambiental e somente os produtos que atenderem a esses critérios receberão um rótulo ambiental. Estão sendo desenvolvidos critérios para vinte categorias de produtos, entre elas destaca-se o de bulbos de lâmpadas, a cargo do Reino Unido. Esta categoria encontra-se em estágio de consulta para aprovação pelos Grupos de Trabalho da Unidade Européia para Desenvolvimento de Critérios Ambientais (Jpd Training Limited 1996). Embora os critérios de rotulagem ambiental ainda não tenham sido desenvolvidos para a categoria de bulbos de lâmpadas, vislumbra-se que a sua avaliação deva incluir quatro fases principais: produção (inclusive consumo de matérias primas e fabricação de componentes), distribuição (inclusive fabricação de embalagem), uso (eficiência de cada tipo de lâmpada e energia elétrica requerida) e destino final (incluindo transporte ao local de disposição, possibilidade de reciclagem, quantidade de resíduo sólido produzido, poluição de água, solo e ar). De imediato, pode-se perceber que a fase de destino final fornece, de longe, a maior contribuição de impacto global ao meio ambiente. É na disposição final (descarte) que ocorre a liberação do mercúrio contido nas lâmpadas e a lixiviação de outros metais pesados, particularmente do chumbo presente nos bulbos externos de lâmpadas a vapor de mercúrio. A emissão de mercúrio ao meio ambiente, a partir de lâmpadas descartadas, ocorre, na quase totalidade, quando elas se quebram durante o transporte até o destino final e no destino final (aterro e/ou lixão). É fato comprovado que o mercúrio, uma vez no meio ambiente, pode ser convertido por bactérias em metil mercúrio (CH_3Hg^+), afetando ecossistemas expostos a ele e produzindo efeitos deletérios à saúde humana.

4.2.4 – Análises físicas

Foram feitas duas determinações de massa específica do pó de fósforo: $3,13 \text{ g.cm}^{-3}$ e $3,08 \text{ g.cm}^{-3}$. Análises granulométricas dessas amostras em *Cyclosizer Warman* mostraram, uma distribuição percentual concentrada em quatro frações granulométricas principais, com ampla predominância da situada abaixo de $10 \mu\text{m}$ (47%) sobre cada uma das demais (Tabela 4.15). Análises complementares realizadas no Laboratório de Granulometria do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, utilizando equipamento *Sympatec, Helos 12 LA* (Método de Difração de Feixe Laser) confirmaram os dados obtidos e revelaram que, em ambas as amostras, o diâmetro médio de partícula é de $6,10 \mu\text{m}$.

Tabela 4.15 – Análises granulométricas do pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes de 40 W, em Cyclosizer Warman.

Teste 1					
Massa específica: 3,13 g.cm ⁻³					
Ciclone	Diâmetro (µm)	Massa retida (g)	%	% acumulada	
				acima	abaixo
CI 1	34,8	0,00	0,0	0,00	100,00
CI 2	25,8	0,00	0,0	0,00	100,00
CI 3	17,7	1,17	3,90	3,90	96,10
CI 4	12,7	6,32	21,07	24,97	75,03
CI 5	10,2	8,18	27,27	52,24	47,76
Overflow	<10,2	14,33	47,77	100,01	-

Nota:

1) Massa da amostra: 30 g.

Teste 2					
Massa específica: 3,08 g.cm ⁻³					
Ciclone	Diâmetro (µm)	Massa retida (g)	%	% acumulada	
				acima	abaixo
CI 1	35,5	0,00	0,0	0,00	100,00
CI 2	26,4	0,00	0,0	0,00	100,00
CI 3	18,1	0,47	3,13	3,13	96,87
CI 4	13,0	2,89	19,27	22,40	77,60
CI 5	10,4	3,47	23,13	45,53	54,47
Overflow	<10,4	8,17	54,47	100,0	-

Nota:

1) Massa da amostra: 15 g.

4.3 – PESQUISA DE PATENTES E ESTADO DA ARTE SOBRE RECICLAGEM DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

4.3.1 – Pesquisa de patentes

Até o final do mês de janeiro de 2000, época em que foi concluída a busca de patentes nos *sites* especializados (INPI 1999, USPTO 1999, EPO 1999, CIPO 1999) foram encontrados 41 registros, distribuídos em dois grandes grupos. Os códigos utilizados nesta Tese para a identificação de países e organizações foram: AT – Áustria; AU - Austrália; BR – Brasil; CA – Canadá; CN – China; DE – Alemanha; DK – Dinamarca; EP – European Patent Office; ES – Espanha; FI – Finlândia; JP – Japão; NL – Holanda; NO – Noruega; SE – Suécia; US – United States of America e WO – World Intellectual Property Organization.

■ 1º Grupo

Patentes que descrevem tecnologias para quebraamento/esmagamento/cominuição de lâmpadas envolvendo operações unitárias de britagem, moagem, peneiramento, separação gravimétrica/eletrostática, ciclonação e exaustão.

Algumas dessas patentes descrevem tecnologias voltadas especificamente para a redução inicial do volume de lâmpadas, antes de serem transportadas (*drum top crushing*). Existe uma variedade desses dispositivos, indo desde simples, sem controle de emissões, aos mais complexos, com controle de emissões de mercúrio (Usepa 1997a).

No 1º grupo foi contabilizado o total de 32 (trinta e duas) patentes registradas:

US 5,957,387; US 5,899,395; US 5,890,940; US 5,884,854; JP 11,067,151;
US 5,769,336; US 5,743,473; JP 10,043,625; US 5,695,069; US 5,685,335;
US 5,683,041; US 5,660,338; US 5,636,800; US 5,586,730; US 5,580,006;
US 5,575,429; US 5,542,535; US 5,492,278; DE 4,443,234; DE 4,401,351;
US 5,388,773; US 5,375,774; US 5,205,497; US 5,092,527; DE 4,030,732;
US 5,042,724; US 4,840,314; US 4,715,838; US 4,655,404; US 4,607,798;
JP 61,153,188 e US 4,579,287.

As patentes norte-americanas (81,2%) predominam amplamente sobre as demais: japonesas (9,4%) e alemãs (9,4%). A primeira patente é de abril/1996 - Patente US 4,579,287, e a mais recente de setembro/1999 – Patente US 5,957,397.

■ 2º Grupo

Patentes que descrevem tecnologias para a recuperação do mercúrio contido em lâmpadas, no total de 9 (nove):

NL 1,004,566; JP 10,052,681; BR 9.204.043; US 5,106,598; US 5,646,660;
US 4,481,889; US 4,268,306; JP 54,102,229; JP 52,127,471.

O registro de patente brasileira BR 9.204.043, de outubro/92, solicitado pela empresa Apliquim Equipamentos e Produtos Químicos Ltda., encontra-se ainda no *status* de pedido, com o depositante discutindo detalhes do processo com o órgão competente (INPI 1999).

As tecnologias envolvidas nas patentes supramencionadas são:

❖ Processo térmico (destilação), no total de 8 (oito) patentes:

NL 1,004,566; JP 10,052,681; US 5,646,660; US 4,481,889; US 4,268,306;
JP 54,102,229; JP 52,127,471 e BR 9,204.043.

A primeira patente - JP 52,127,471 - foi registrada no Japão, em outubro de 1977, pela empresa Toshiba Corporation. As patentes NL 1,004,566 e JP 10,052,681 descrevem tecnologias integradas, envolvendo tanto o processo físico/mecânico como o processo térmico para a recuperação do mercúrio contido nos resíduos.

❖ Processo químico, no total de uma patente:

US 5,106,598.

A patente US 5,106,598, de abril/1992, menciona um processo envolvendo operações tais como trituração de lâmpadas, lavagem do pó de fósforo, peneiramento, centrifugação, decantação, tratamento químico (oxidação do mercúrio), ajuste de pH de águas residuárias e troca iônica por meio de resina (Cogar 1992).

Foram ainda relacionados 7 (sete) subgrupos de patentes, cada um com patentes equivalentes entre si, depositados pelos requerentes em diversos países e organizações, no total de 33:

- AU 9,130,082; CA 11,188,283; US 4,655,404; WO 8,301,396;
- AT 214,787; DE 3,730,260; DK 161,621; EP 287,540; FI 83,043; SE 457,149;
US 4,840,314;
- CA 2,086,085; US 5,205,497;
- CA 2,169,214; US 5,575,429;

- AT 180.692T; AU 5,130,696; CN 1,182,380; DE 6,960,273/2D; EP 817,685; JP 11,502,153T; SE 9,501,057; US 5,884,854; WO 9,629,157;
- AU 5,070,198; EP 946,770; NL 1,004,566; NO 992,221; WO 9,822,628;
- DE 4,443,234; EP 713,733; ES 2,121,290; NL 9,402,135.

Para efeito meramente do levantamento estatístico apresentado neste trabalho, foram feitas as seguintes considerações:

- 1) os EUA tomados como país de registro principal, para as patentes equivalentes, as quais foram registradas em outros países e organizações internacionais (Patentes US 4,655,404, US 4,840,314, US 5,205,497, US 5,575,429, US 5,884,854);
- 2) o país de registro do requerente para os outros dois grupos de patentes equivalentes que não tiveram seus registros depositados nos EUA (Patentes NL 1,004,566 e DE 4,443,234); e
- 3) abstração das patentes equivalentes.

Fazendo-se tais considerações, foi possível extrair a seguinte estatística:

País de registro	Número de patentes	Porcentagem
Estados Unidos da América (US)	30	73,17
Japão (JP)	06	14,63
Alemanha (DE)	03	7,32
Brasil (BR)	01	2,44
Holanda (NL)	01	2,44
Total	41	100,00

Há de se mencionar, ainda, que no início de 1991 as técnicas européias eram divididas em dois grupos básicos: métodos úmidos e métodos secos. A Companhia Aquacontrol (Alemanha) utilizava o método úmido, pelo qual as lâmpadas eram quebradas e trituradas em uma solução de sulfeto de sódio. A empresa Recitec (Suíça) quebrava as lâmpadas a seco, mas processava-as em solução de BF_3 . Em ambos os processos o mercúrio residual no vidro era da ordem de 500 ng.g^{-1} . As empresas Runstat e Thur (Alemanha), Sovag (Suíça) e LumenEx (Holanda) processavam suas lâmpadas utilizando métodos secos. Estas empresas reportavam que o mercúrio residual no vidro variava de 3 a $5 \mu\text{g.g}^{-1}$ (Usepa 1998f).

As tecnologias mais recentes foram desenvolvidas utilizando-se, basicamente, operações unitárias a seco (britagem, moagem, separação magnética, cicloneamento, filtração) e aquecimento do resíduo (retortagem) seguido de resfriamento, em dispositivos hermeticamente fechados. Normalmente, estas operações são conduzidas sob pressão negativa (vácuo) a fim de evitar a fuga de poluentes (mercúrio) ao meio ambiente.

O incremento do volume de requerimentos de patentes, principalmente a partir de meados da década de 90, indica o nitido direcionamento das pesquisas, no nível mundial, para a atividade de reciclagem de lâmpadas. Hoje, a tendência tecnológica é utilizar métodos físicos/mecânicos de separação para recuperação dos diversos subprodutos, e método térmico para a recuperação do mercúrio. Isso significa dizer que a recuperação hidrometalúrgica (precipitação de compostos insolúveis de mercúrio) tem cedido espaço para a recuperação termal.

Tecnologias para eliminar o mercúrio contido em produtos tais como as lâmpadas de mercúrio, diferentemente das mencionadas nesta pesquisa, como por exemplo, a incineração de resíduos, não tiveram sucesso junto aos órgãos ambientais em todo o mundo e não foram objeto de registros de patentes (pelo menos nos *sites* consultados).

Da análise documental das patentes foi possível extrair as seguintes características:

■ Patentes referentes ao estágio de quebramento/esmagamento/separação

As patentes descrevem, normalmente, operações unitárias de quebramento, esmagamento, cominuição e/ou moagem de lâmpadas para a redução do volume e tamanho de partículas, peneiramento, separação eletrostática e ciclonação para separação dos diversos constituintes. Todos os processos relacionados são executados a seco, em containers de diversas formas (tambores, caçambas e container padrão), em unidades móveis ou não, hermeticamente fechados, sob pressão negativa (vácuo). Sistemas de exaustão com filtros (carvão ativado como elemento filtrante) são propostos para funcionar, simultaneamente com as ditas operações, a fim de purificar a poeira formada. O elemento filtrante é especialmente tratado para remover o vapor de mercúrio do ar exaurido. Todas as patentes mencionam métodos para processamento de lâmpadas fluorescentes, à exceção da Patente DE 4.443.234, que se destina ao processamento de lâmpadas de alta pressão (tipo HID).

Os inventores que mais apresentaram criações foram: Perry, T. J. (4 patentes) e Deklerow, J. W. (3 patentes), Sewill, D. et al. (2 patentes), norte-americanos, e Kulander, H. (2 patentes), sueco. Dentre as principais requerentes contam-se Mercury Recovery Technology AB - MRT (3 patentes), empresa sueca; Dextrite Inc. (3 patentes), Budget Lamp Reclaimers, Inc. (2 patentes), empresas norte-americanas e Werec GmbH Berlin Wertstoff (2 patentes), empresa alemã.

A Patente US 5,884,854 – “*Method and system for mechanical separation of various materials substances from disposed fluorescent light tubes and similar lamps being crushed*” -

possui o maior número de patentes equivalentes (total de 8 patentes) (Sundberg e Mangnsson 1999).

■ Patentes referentes ao estágio de recuperação do mercúrio contido

A predominância de patentes é dos japoneses e suecos, cada um com 3 patentes registradas. A empresa sueca MRT, sucessora da empresa Lumalampam Aktiebolag apresenta, individualmente, o maior número de patentes registradas (total de 3 patentes).

Dois processos distintos para a recuperação do mercúrio contido nos resíduos de lâmpadas foram individualizados: (i) processo térmico (89% das patentes requeridas) e (ii) processo químico (11%). As patentes mais recentes não utilizam o processo químico para a recuperação do mercúrio contido em lâmpadas. O processo térmico tem a preferência mundial, uma vez que o mercúrio é considerado um dos metais que mais facilmente se recupera pelo processo de destilação (Usepa 1999).

4.3.2 – Pesquisa de tecnologia junto aos fabricantes de equipamentos

Além da pesquisa de patentes foram feitos diversos contatos com fabricantes de equipamentos para de-mercurização de lâmpadas de mercúrio.

Contatos mantidos com fabricantes dos EUA e Europa mostraram que os equipamentos disponíveis no mercado são, na sua grande maioria, constituídos por unidades fixas, geralmente pesadas, que funcionam de modo não integrado. Os processadores disponíveis são: (i) processadores para quebramento/esmagamento de lâmpadas e ii) processadores para a destilação do mercúrio contido nos resíduos de lâmpadas. Existe uma nítida preferência para o processo térmico.

Dentre os principais fornecedores, podem ser citados: MRT (Suécia), Werc GmbH Berlin Wertstoff (Alemanha) e Dytec Environmental, AERC/MTI, Bethlehem Apparatus Company, Inc. (EUA). A empresa MRT destaca-se entre as demais pela fabricação de equipamentos para reciclagem de lâmpadas, com patentes desenvolvidas e depositadas em diversos países. Seus equipamentos, produzidos em série, são: *Compact Crush and Separation Plant, HID Lamp Crusher, End Cut Machine and Special Distiller* (MRT 1998).

Ficou constatado também que diversas recicladoras em operação desenvolveram, ao longo dos anos, seus próprios equipamentos (sem patenteá-los) como, por exemplo, a fábrica da Osram na Alemanha, a Apliquim no Brasil, *AERC MTI, SLR Technologies, Ecolights Northwest e Bethlehem Apparatus Company* nos EUA.

A última inovação no mercado está voltada para o sistema de corte dos terminais e retirada do pó de fósforo por sopro/pulsção de ar (*end cut and air push system*), o qual destina-se a atender as exigências e demandas feitas por fabricantes e grandes recicladores de lâmpadas, em termos de pureza dos subprodutos (MRT 1998).

4.3.2.1 – Equipamentos fabricados pela Mercury Recovery System AB (MRT)

A. MRT, empresa sueca fabricante de equipamentos sediada em Karlskrona, comercializa em quase todo o mundo os mais refinados equipamentos para a recuperação de mercúrio em resíduos de lâmpadas.

O processo de recuperação do mercúrio é dividido em dois estágios (MRT 1998). Primeiro, o material é separado em três frações: (i) vidro (ii) metais e (iii) pó de fósforo. Em seguida, o mercúrio é recuperado do pó de fósforo pelo processo térmico (destilação).

No processo inicial, utiliza-se um processador (modelo C/S) para quebra/cominuição das lâmpadas e separação dos diversos componentes. Este processo é incorporado em um *container* padrão de 20 pés (seis metros de comprimento). Todo o conjunto dentro desse *container* é operado sob pressão negativa para minimizar emissões fugitivas. O equipamento, denominado de processador compacto, é versátil (pode operar estacionariamente ou em unidade móvel), totalmente automático e permite o processamento de vários tipos e tamanhos de lâmpadas fluorescentes.

O pó de fósforo é separado dos demais subprodutos em diferentes estágios por um sofisticado sistema patenteado de transporte de ar (circulação e exaustão), enquanto as frações ferro-metálicas, por separadores eletrostáticos, Figuras 4.5 e 4.6. A descarga dos subprodutos se faz da seguinte maneira: vidro, pela parte frontal externa do *container*; frações metálicas, em coletores internos; e as partículas finas (vidro e pó de fósforo) em ciclones e filtros localizados no interior do próprio *container*.

Após a quebra e separação dos diversos subprodutos, o passo seguinte no processo de reciclagem é a recuperação do mercúrio contido no pó de fósforo. Para isto, a MRT disponibiliza uma unidade de destilação do tipo *standard*, também patenteada, que trabalha em regime de batelada. Os resíduos de lâmpadas são colocados em uma câmara a vácuo, sob a forma de um cilindro e tratados por um processo totalmente automático, no qual ocorrem as seguintes fases: (1) aquecimento, (2) combustão de partículas orgânicas e (3) resfriamento (condensação do Hg), Figura 4.7.

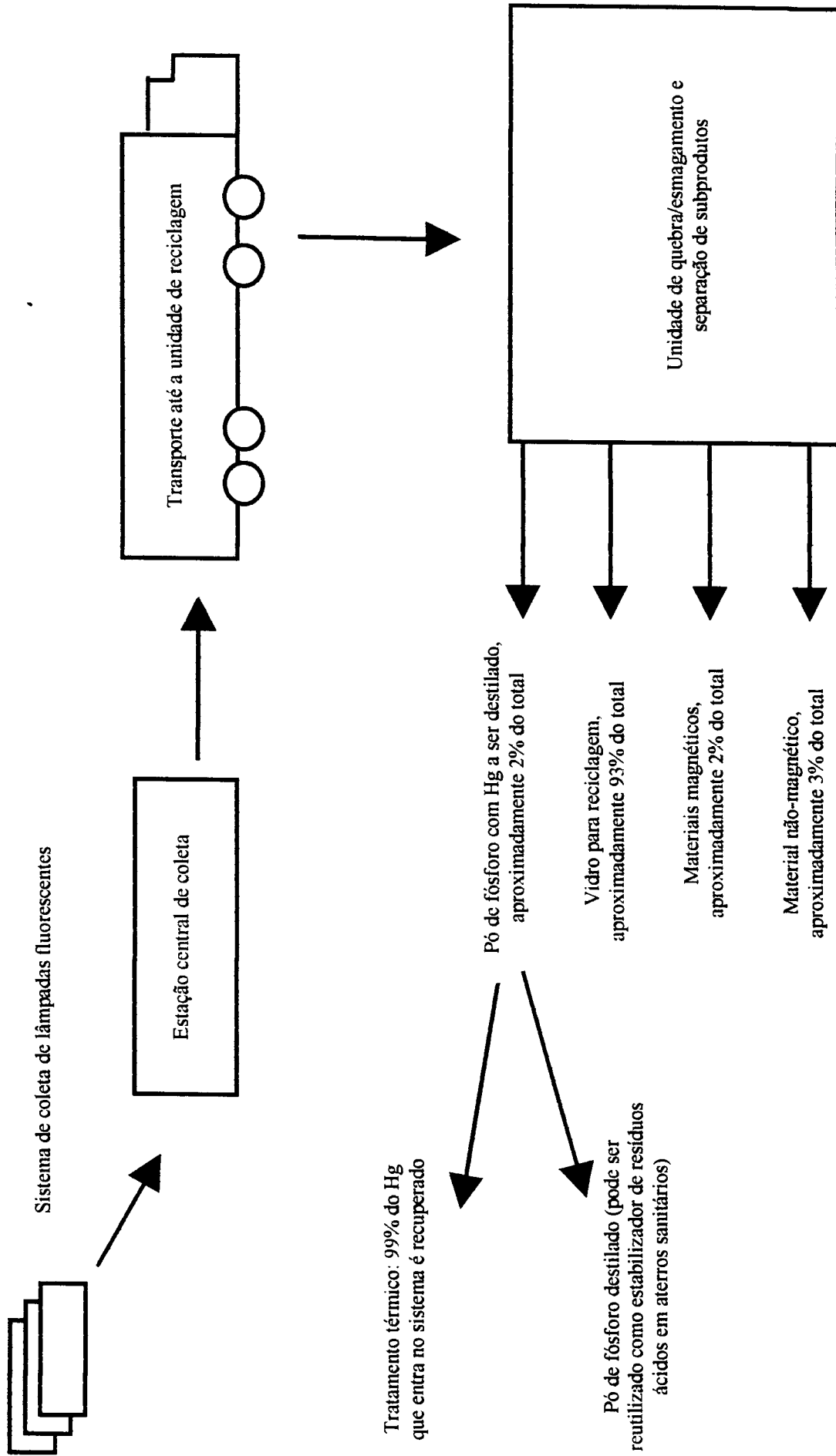


Figura 4.5 – Fluxograma de coleta e tratamento de lâmpadas fluorescentes – MRT.

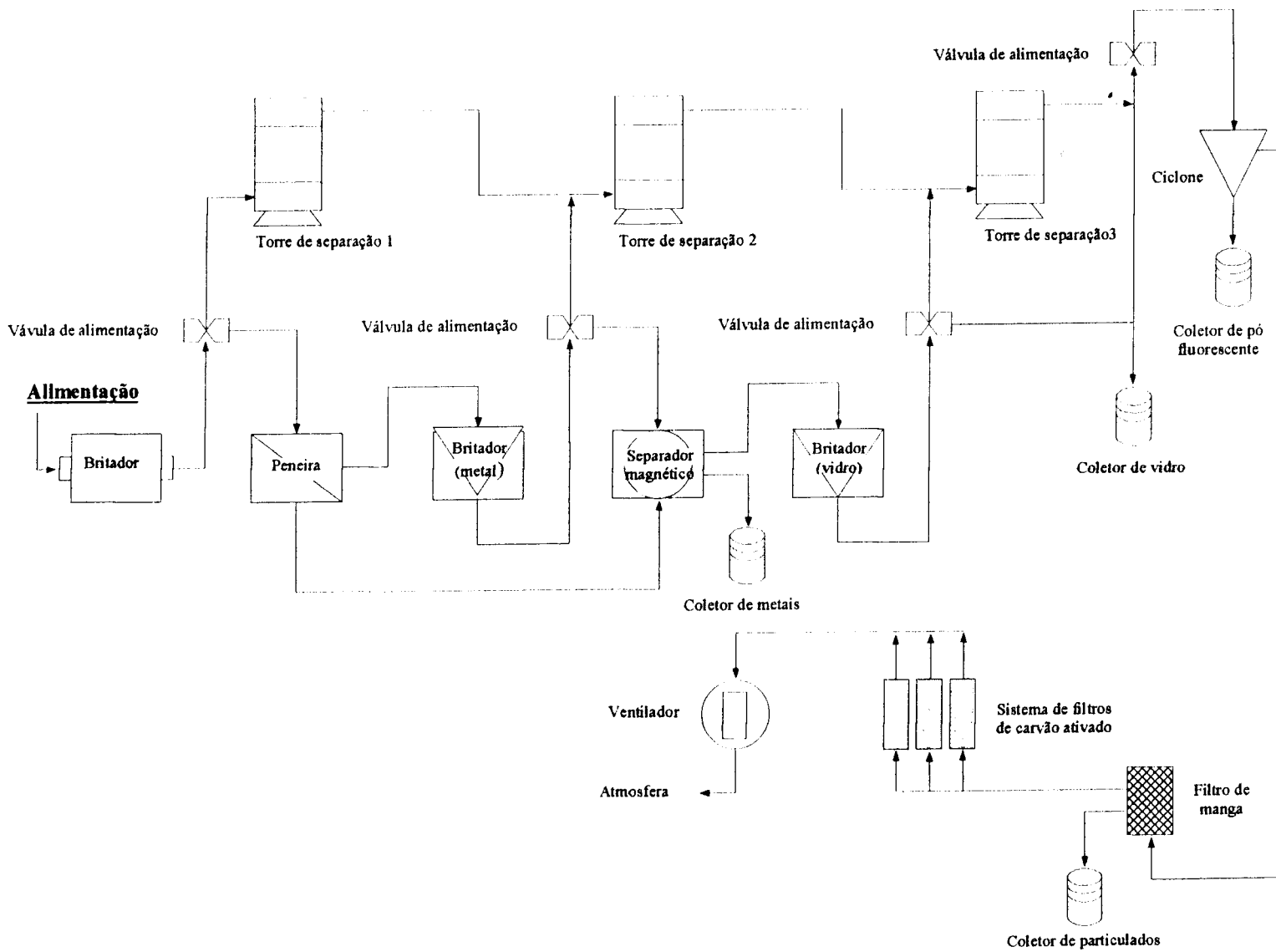


Figura 4.6 – Fluxograma de operações utilizado no processador C/S, fabricado pela MRT.

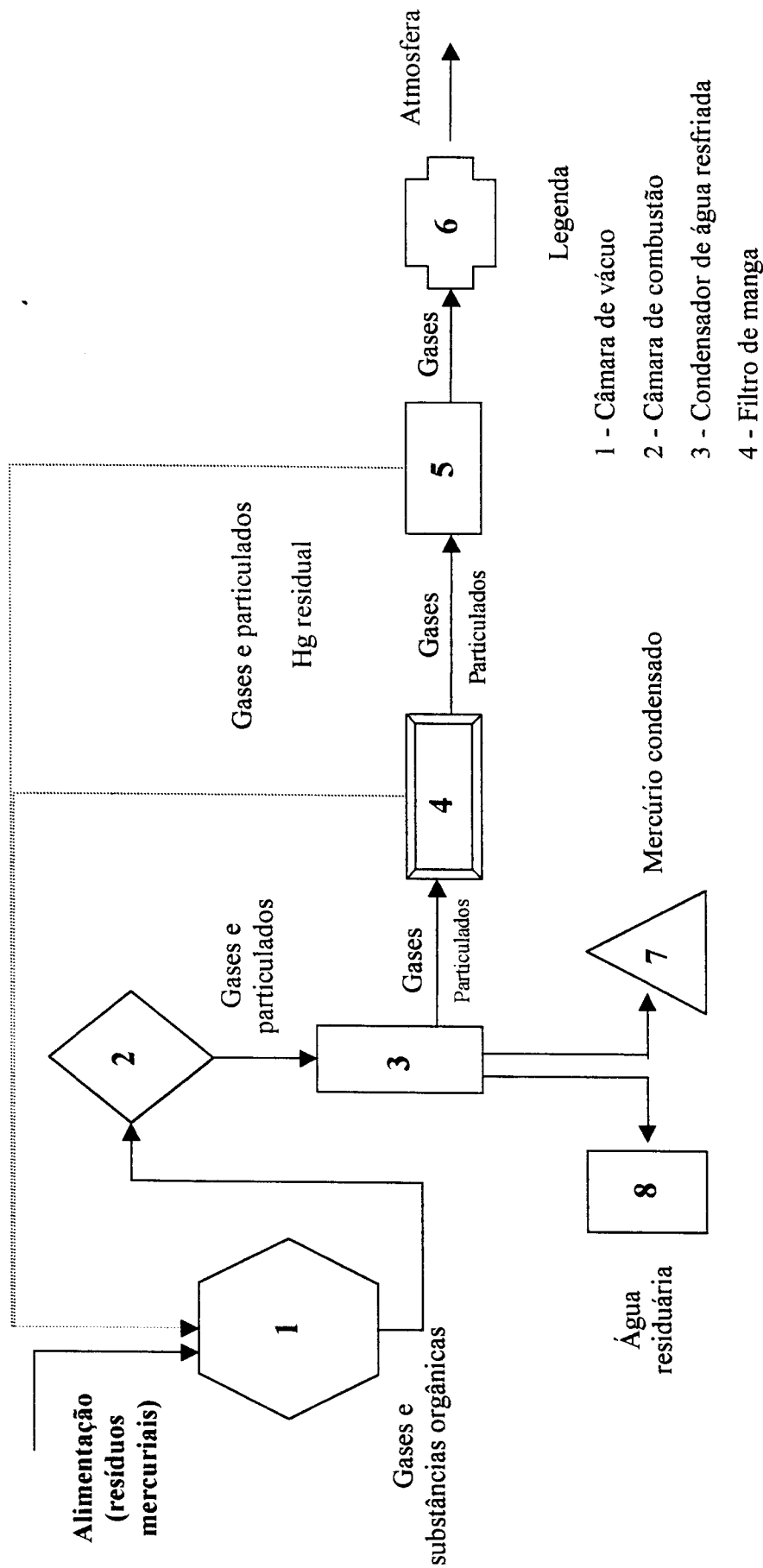


Figura 4.7 - Fluxograma do processo de destilação (MRT standard distiller).

Na fase de aquecimento, o resíduo é aquecido e o mercúrio vaporizado. As partículas orgânicas formadas são carregadas pelo gás de arraste (N_2) e oxidadas (O_2) em uma câmara cilíndrica de combustão. Após o aquecimento e a combustão das partículas orgânicas, a fase subsequente é a condensação dos vapores formados. Primeiro, ocorre a condensação do vapor d'água (água proveniente da umidade do resíduo) e, em seguida, do vapor de mercúrio.

De acordo com a MRT, o mercúrio que entra no circuito integrado (processador C/S e unidade de destilação) pode ser recuperado em 98,8%. Os cálculos do balanço de massa mostram que as perdas são: 0,2% em emissões nos filtros de carvão, 0,2% no processo de quebra das lâmpadas e 0,8% no resíduo. Dessa última, 0,7% permanecem no vidro, 0,02% no metal e 0,03% no pó de fósforo, perfazendo um total de 0,75% (Usepa 1998f).

Existe ainda um processador destinado ao processamento de lâmpadas HID (vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores metálicos). É um equipamento estacionário ou móvel, que trabalha sob pressão negativa para evitar emissões fugitivas de vapor de mercúrio e particulados. As lâmpadas são passadas em um britador revestido de paredes de borracha para quebra do bulbo externo. O *pellet* de vidro sílica, que contém o mercúrio, é separado e enviado à unidade de destilação. A fração de particulados proveniente do processo é coletada em um sistema de filtros com carvão ativado e enviada, também, para a destilação, Figura 4.8.

A seguir, encontram-se resumidas as características técnicas dos equipamentos supramencionados.

❖ **Processador para lâmpadas fluorescentes, modelo C/S (Figura 4.9)**

- Capacidade de trabalho (performance): 2.000 tubos por hora.
- Dimensões: comprimento: 6,06 m; largura: 2,45 m; altura: 2,60 m.
- Peso: 5 t.
- Nível de ruído: 75 a 80 db; Consumo elétrico: máximo de 25 kWh, 400 V, 50 c
- Ar comprimido: min 6,5 bar, aproximadamente 250 L/min; exaustor de ar: 1.500 m³/h.
- Hg no vidro e metais: máx. de 0,2 mg.L⁻¹; Hg para a atmosfera: máx. de 0,0025 mg.m⁻³.
- Preço unitário: USD\$ 365,000, com transporte, seguro e frete inclusos (*Cost, Insurance, Freight – CIF, Rio de Janeiro*).
- Classificação deste equipamento no Sistema Harmonizado: 847410.
- Taxas de importação: 20% de Imposto de Importação (II); 0% de Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI); 18% de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS).

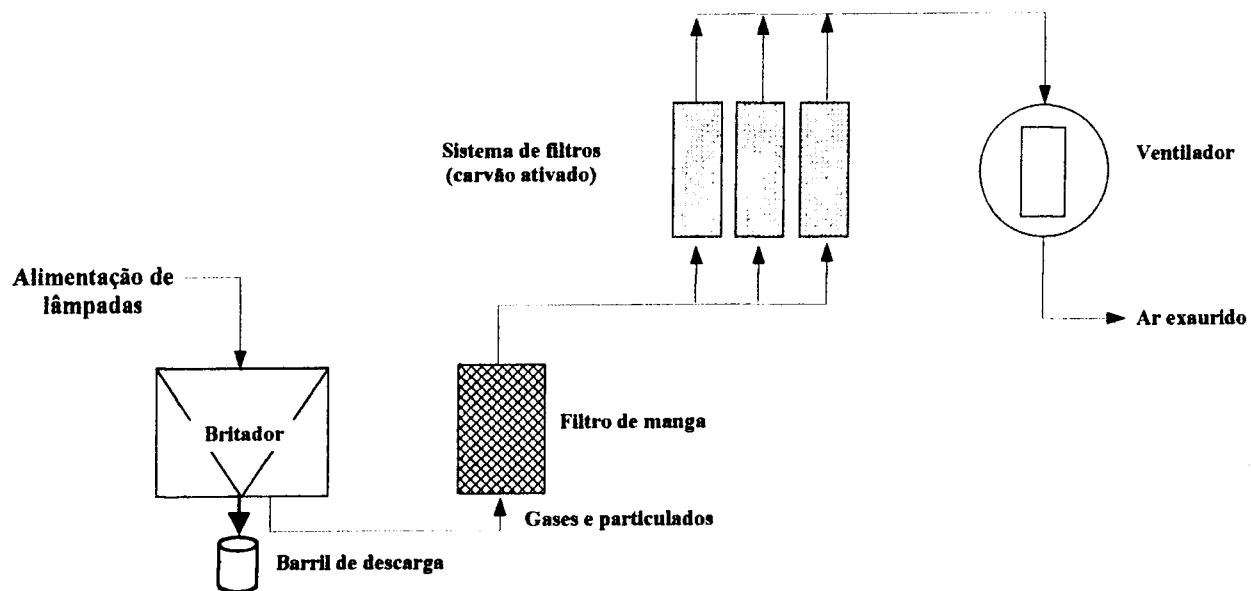


Figura 4.8 – Fluxograma utilizado no processamento de lâmpadas HID – MRT.

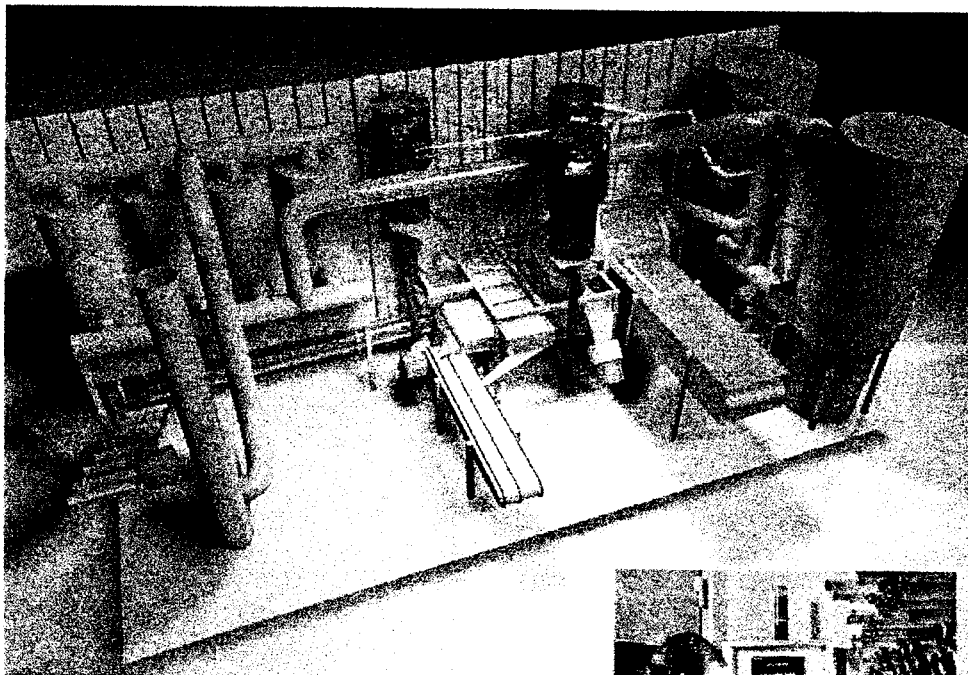
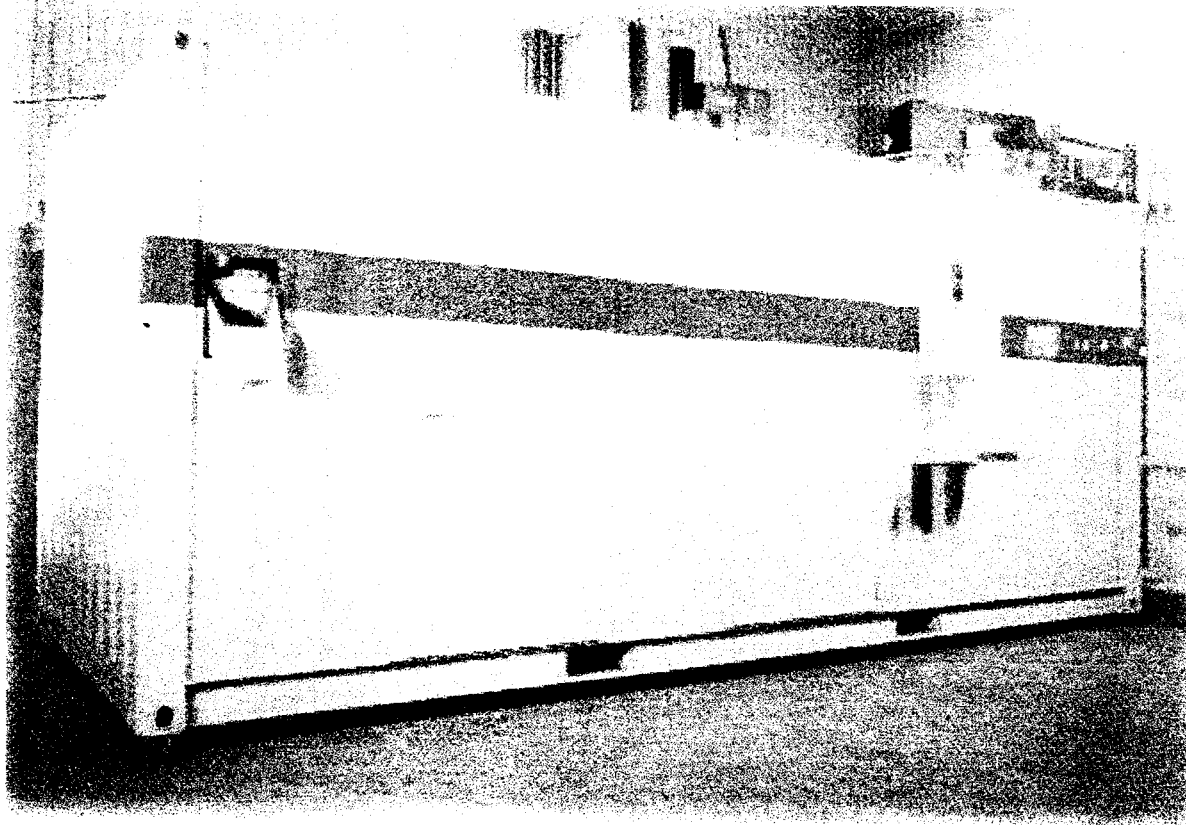


Figura 4.9 – Vista frontal do processador de lâmpadas fluorescentes fabricado pela MRT, modelo C/S, montado em um *container* de 20'. Na foto inferior, vista interna do *container*.

❖ **Processador para lâmpadas tipo HID** (Figura 4.10)

- Capacidade de trabalho (performance): 2.000 lâmpadas por hora; redução de volume: 6-8 vezes.
- Dimensões: comprimento: 1,50 m; largura: 1,50 m; altura: 1,20 m.
- Peso: 250 kg.
- Nivel de ruído: 75 a 80 db.
- Consumo elétrico: máximo de 4 kW, 380V, 50 c.
- Exaustor de ar: 500 m³/h.
- Espaço necessário: 4,00 m de comprimento x 2,00 m de largura.
- Preço por unidade: USDS 45,000 (preço CIF – Rio de Janeiro).
- Classificação deste equipamento no Sistema Harmonizado: 847420.
- Taxas de importação: 20% de II; 0% de IPI; 18% de ICMS.

❖ **Unidade padrão de destilação** (Figura 4.11)

- Capacidade de trabalho (performance): 100 L/batelada de pó de fósforo.
- Tempo de processamento: 16 h.
- Dimensões: comprimento: 2,99 m; largura: 1,58 m; altura: 2,60 m.
- Peso: 1,5 t.
- Temperatura máxima alcançada: 800 °C (fase de aquecimento).
- Temperatura da água de resfriamento: +5 °C.
- Consumo

Necessidade: máximo 35 kW.

Consumo elétrico: 200 kWh por batelada;

Ar comprimido: máximo 300 m³ por batelada.

Oxigênio: 15 m³ por batelada.

Nitrogênio: 10 m³ por batelada.

- Hg no pó: máximo de 0,2 mg/L.
- Hg para a atmosfera: máximo de 0,020 mg/m³ (média > 0,0005 mg/m³).
- Pureza do mercúrio destilado: 99,99%.
- Grau de recuperação do mercúrio: 99,99%.
- Mercúrio residual: máximo 0,1 mg.L⁻¹.

- Preço por unidade: USD\$ 260,000 (transporte e seguro inclusos, preço CIF – Rio de Janeiro). Treinamento e instalação, vide Processador MRT.
- Classificação deste equipamento no Sistema Harmonizado: 841990.
- Taxas de importação: 20% de II; 8% de IPI; 18% de ICMS.

A última inovação tecnológica apresentada pela MRT no mercado de reciclagem de lâmpadas é o equipamento ECM 5000, atualmente em operação nas empresas Indaver Relight – Antuérpia (Bélgica), e Elektro Miljo A/S – Vejle (Dinamarca). O ECM 5000 utiliza a tecnologia de corte das extremidades das lâmpadas e sistema de pulsação de ar para retirada do pó de fósforo (*end cut and air push system*). A capacidade desta máquina pode alcançar 5.000 tubos por hora. As emissões de mercúrio são tão baixas que podem ser negligenciadas. Os subprodutos, excepcionalmente limpos, podem ser reutilizados pelos próprios fabricantes de lâmpadas. Os tubos intactos resultantes do processo podem ser reutilizados na manufatura de novas lâmpadas com comprimentos menores.

4.3.2.2 - Equipamentos fabricados nos EUA

❖ Processador Dytek – Série 3600 (Figura 4.12)

É um processador fabricado pela Dynamic Technologies for the Environmental Industry – Dytec (1998), sediada em Blaine, Minneapolis. O Dytek 3600 é um equipamento automático, compacto, estacionário, trabalha sob pressão negativa e permite tratar lâmpadas fluorescentes e lâmpadas HID, separando os diversos constituintes em 3 classes: vidro, terminais de alumínio/pinos de latão e poeira carregada com mercúrio. Esse equipamento possui um microprocessador para controlar, automaticamente, a alimentação de lâmpadas. A empresa não fabrica equipamentos para a recuperação do mercúrio contido em resíduos.

As características técnicas deste equipamento são:

- Capacidade de trabalho: 3.600 lâmpadas por hora, o que equivale à alimentação de 1 lâmpada por segundo.
- Dimensões: comprimento: 5,50 m; largura: 1,98 m; altura: 3,82 m.
- Emissão de mercúrio para a atmosfera: bem abaixo dos limites da Osha.
- Preço por unidade: USD\$ 331,625 (preço posto a bordo - *Free on board* – FOB, Blaine, Minneapolis, EUA).
- Classificação deste equipamento no Sistema Harmonizado: 847410.

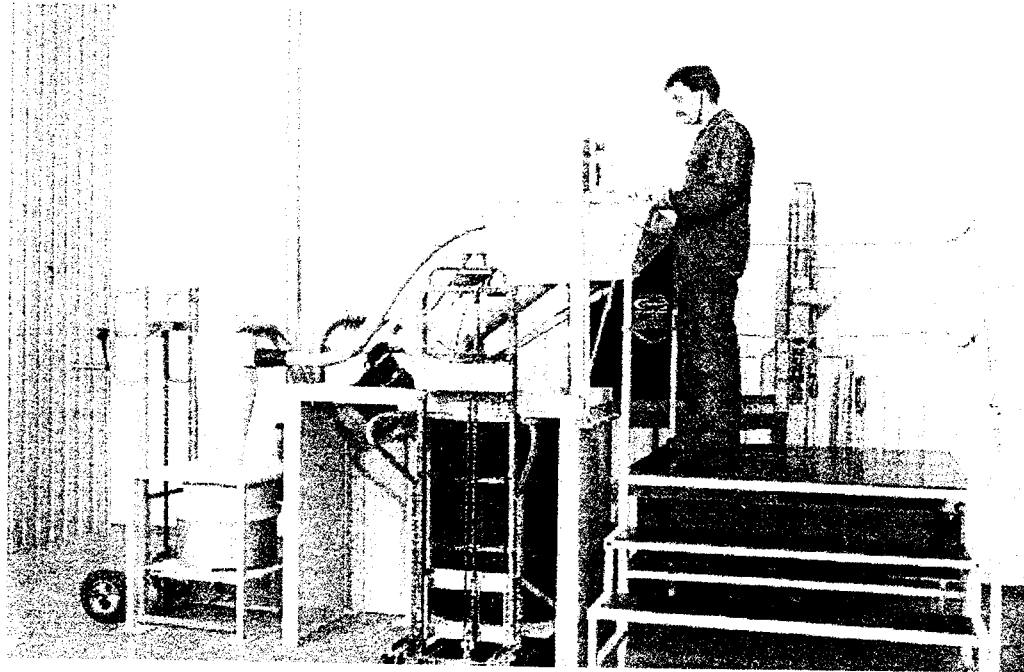


Figura 4.10 – Processador de lâmpadas HID, fabricado pela MRT.

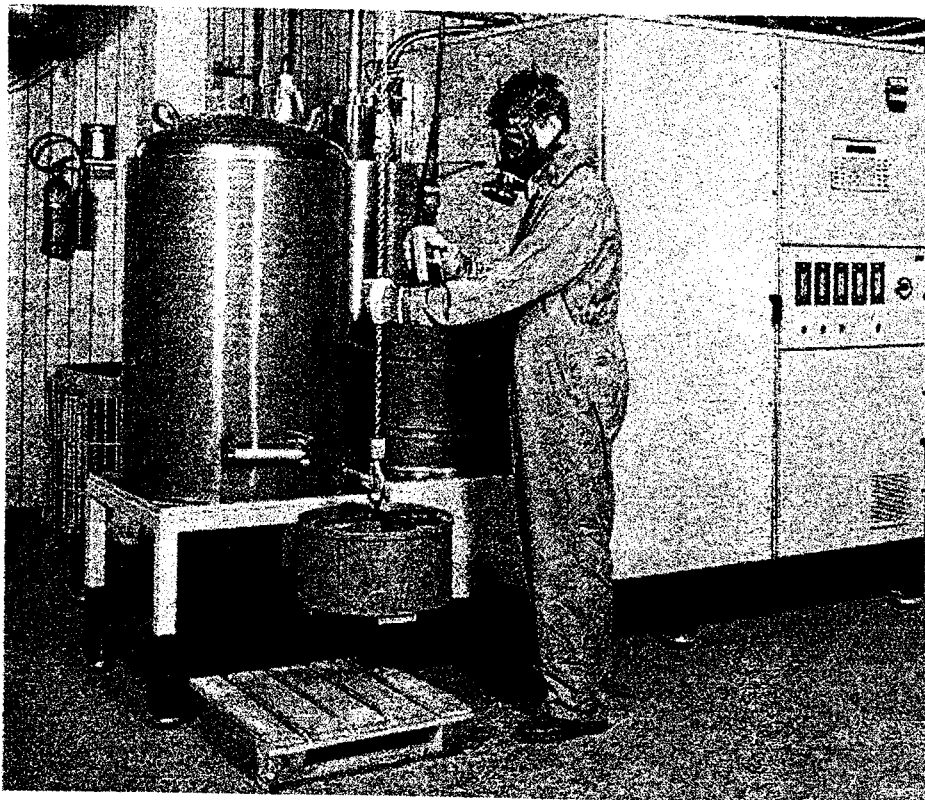


Figura 4.11 – Unidade de destilação de mercúrio, modelo standard, fabricada pela MRT.

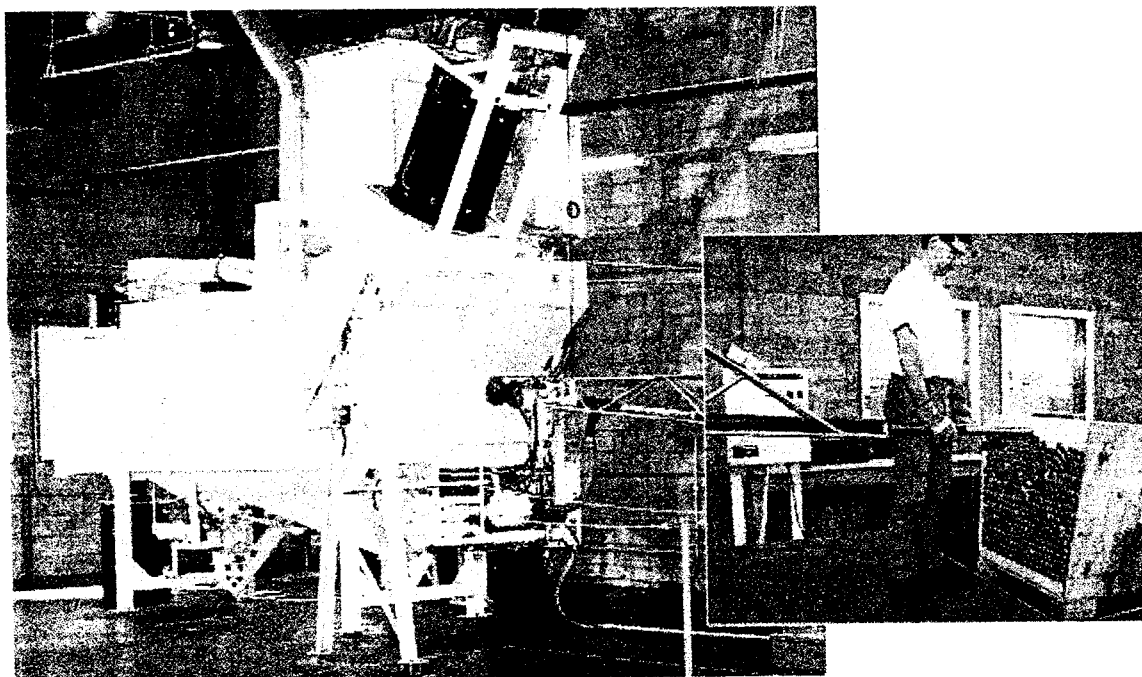


Figura 4.12 – Processador de lâmpadas fluorescentes, modelo 3600, fabricado pela DYTEC.

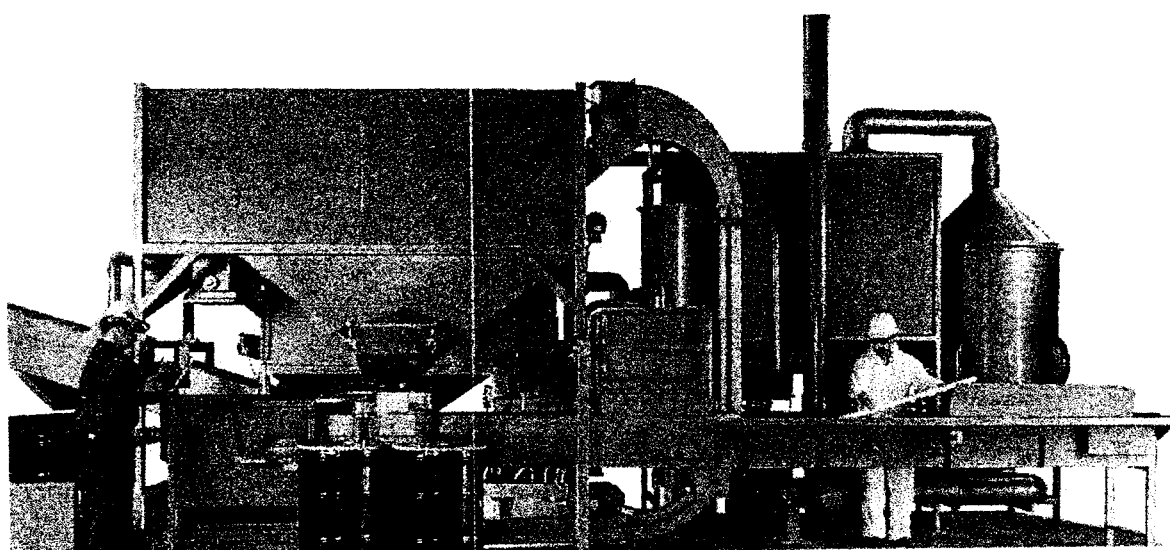


Figura 4.13 – Processador de lâmpadas fluorescentes, modelo LSS1, fabricado pela AERC.

❖ **Processador LSS1** (Figura 4.13)

O Processador LSS1 é fabricado pela Advanced Environmental Recycling Company – AERC (1998), sediada em Flanders, New Jersey. Essa empresa é uma das maiores recicladoras existentes nos EUA (100.000 lâmpadas por dia). A AERC não comercializa equipamentos para a recuperação de mercúrio.

O equipamento é compacto, estacionário e opera sob pressão negativa para evitar emissões fugitivas de vapor de mercúrio. O modelo LSS1 utiliza um sistema integrado para separar os componentes da lâmpada. Lâmpadas fluorescentes de todas as formas geométricas podem ser trabalhadas nesse processador. Uma vez quebradas, as peças esmagadas são conduzidas a um sistema de peneiramento para separar vidro, alumínio e poeira de fósforo.

Uma câmara de deglobagem permite ao operador remover para o exterior o globo de vidro das lâmpadas HID. Os *pellets* dessas lâmpadas são coletados para se recuperar o mercúrio contido.

Cada modelo LSS1 é equipado com um sistema de vácuo, que é utilizado para limpar qualquer material transbordado durante o processamento. Duas ou três pessoas são suficientes para operar esse equipamento.

Dados técnicos:

- Capacidade de trabalho (performance): 1.000 a 3.000 lâmpadas por hora.
- Dimensões: comprimento: 9,15 m; largura: 3,05 m; altura: 3,60 m.
- Conteúdo de mercúrio: dentro dos limites estabelecidos pela Osha.
- Preço por unidade: USD\$ 300.000 (incluso transporte e entrega, posto em Belo Horizonte). A AERC cobra ainda USD\$ 55.000 para instalação/operação do equipamento e treinamento de pessoal. O preço total é de USD\$ 355.000.
- Classificação desse equipamento no Sistema Harmonizado: 847410.

❖ **Destilador Bethlehem** (Figura 4.14)

O destilador Bethlehem é fabricado pela Bethlehem Apparatus Company, Inc. (1999), sediada em Hellertown, Pennsylvania. Essa empresa opera a maior recicladora comercial de mercúrio dos EUA e recicla todos os tipos de produtos contendo mercúrio (pilhas, equipamentos elétricos, lâmpadas, termômetros, compostos mercuriais, resíduos provenientes de minas de ouro e zinco, plantas de soda cáustica e amálgamas odontológicos). Muitas empresas norte-americanas utilizam-se dos serviços prestados por essa empresa.

O destilador é dotado de uma câmara de vácuo aquecida eletricamente (resistências blindadas) à temperatura da ordem de 676° C (1.250 °F), com capacidade de 209 litros (Lawrence 1992). O vapor de mercúrio é condensado pela sua passagem em um sistema de condensadores de água resfriada e, em seguida, passa novamente por um sistema de destilação tripla para atingir alta performance de recuperação e pureza (superior a 99,99%), Figura 4.15.

4.3.2.3 - Equipamentos fabricados na Alemanha

Os equipamentos alemães são fabricados pelas empresas Bison e Osima e comercializados pela Werc GmbH Berlim Wertstoff – Alemanha (1999). Existem três equipamentos disponíveis no mercado: FL Recymat 4000/1000, CAP Recymat 300 e HIDL Recymat 750.

❖ FL Recymat 4000/1000 (processador de lâmpadas fluorescentes)

O FL Recymat 4000/1000 trabalha separando os subprodutos em terminais (alumínio e componentes ferro-metálicos), bulbo de vidro e pó de fósforo. Esse equipamento diferencia-se dos anteriores por ser capaz de separar os diversos tipos de pó de fósforo.

Inicialmente, por um sistema ótico, as lâmpadas são separadas de acordo com o tipo de pó de fósforo utilizado (trifósforo, terras raras e halofósforo). Em seguida, os terminais são cortados por queimadores e o pó de fósforo é separado por um sistema de sopro de ar. O bulbo de vidro soda (85,5% da massa total da lâmpada) pode ser, imediatamente, reutilizado na indústria de vidros.

Dados técnicos:

- Capacidade: 3.200 lâmpadas/hora.
- Dimensões: comprimento: 16,0 m; largura: 6,00 m; altura: 4,5 m.
- Peso: 6.600 kg.
- Área requerida: 100 m².
- Ar comprimido: 400 m³.h⁻¹, 6 bar.
- Especificação do ar exaurido:
 - mercúrio (< 5,0 mg.m⁻³);
 - poeira (< 5,0 mg.m⁻³).
- Nível de ruído: < 85 db.

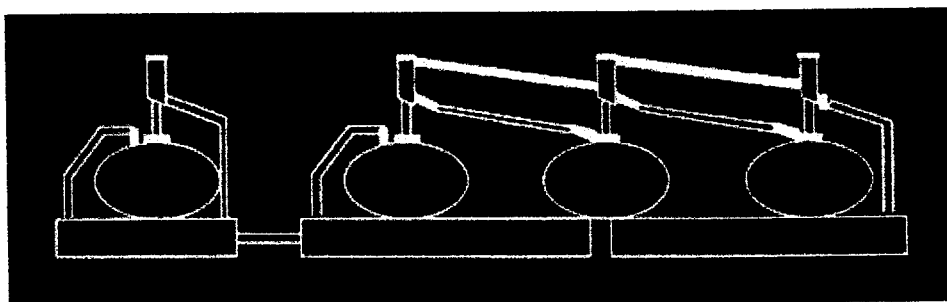
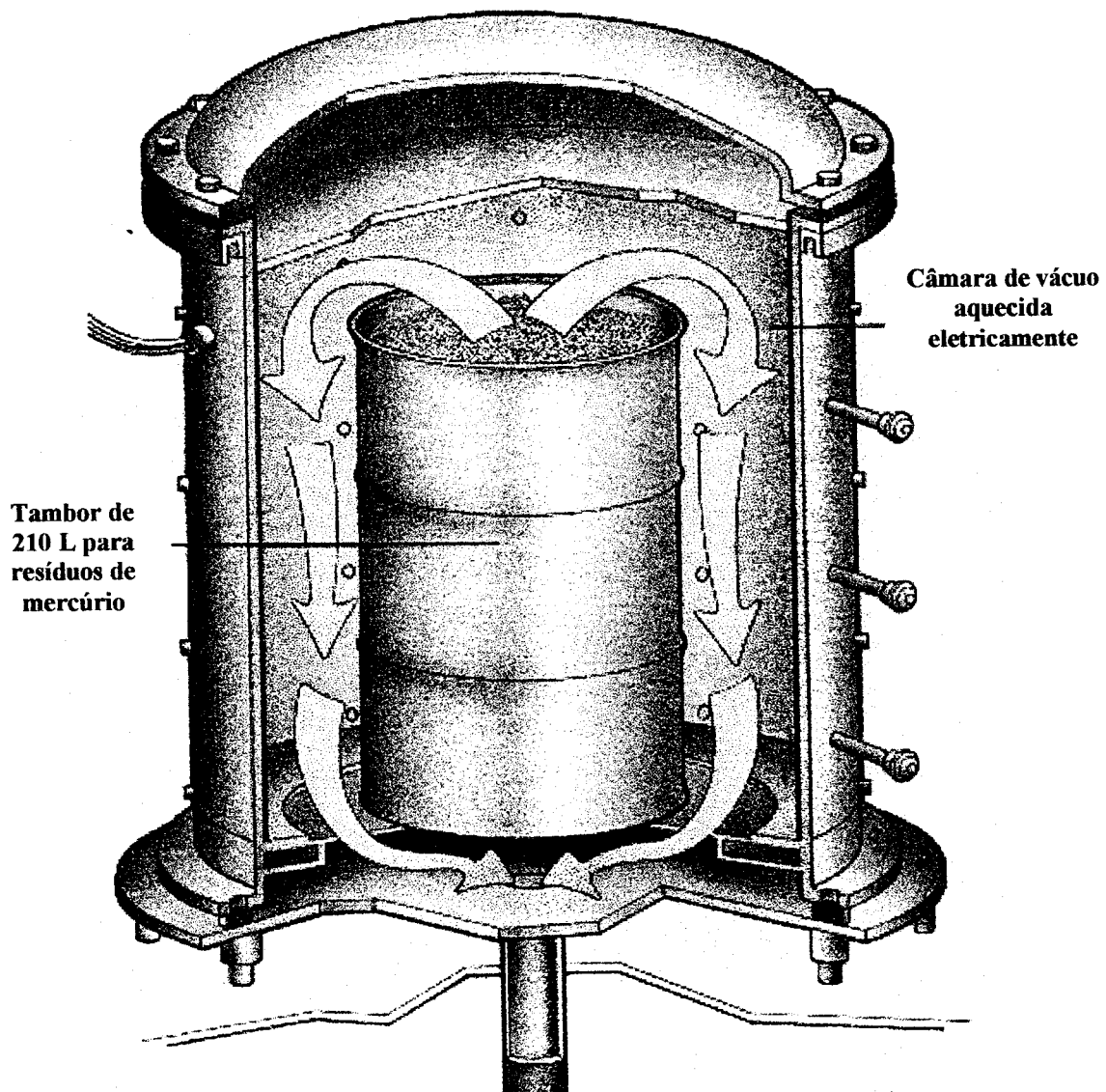


Figura 4.14 – Destilador (foto superior) e sistema de destilação quádrupla (foto inferior) desenvolvidos pela Bethlehem Apparatus Company.

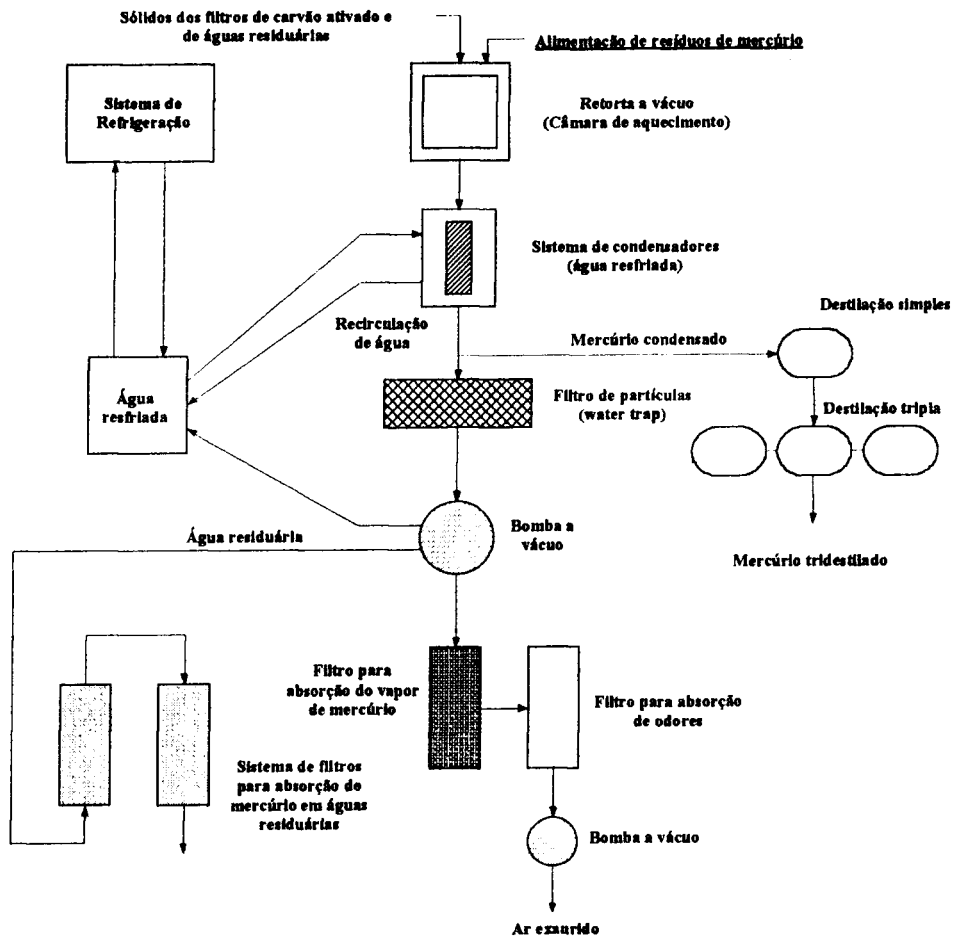


Figura 4.15 – Fluxograma do processo de destilação (Bethlehem Apparatus Company).

❖ CAP Recymat 300

Este equipamento destina-se ao processamento dos terminais separados pelo equipamento FL Recymat 4000/1000. Os terminais são quebrados e separados nas seguintes frações: alumínio, mistura de vidro e plástico e componentes ferro-metálicos. Estes últimos passam em separadores eletrostáticos para a separação das frações magnéticas e não-magnéticas. Por um sistema de atrição e sopro, o pó de fósforo é removido dos subprodutos separados.

Características técnicas:

- Capacidade: 300 kg/h.
- Área requerida: 80 m².
- Ar comprimido: 3 m³.h⁻¹, 6 bar.

❖ HIDL Recymat 750

É um processador de lâmpadas HID. O equipamento é dotado de um alimentador do tipo carrossel e de um detetor a laser para identificação do tipo de vidro utilizado na lâmpada. Uma vez feita a seleção, um queimador faz um corte no bulbo externo, na parte basal da lâmpada, e separa-o do resto da lâmpada. Os diversos componentes são separados e o *pellet* contendo mercúrio é enviado a uma unidade de destilação.

Dados técnicos:

- Capacidade: 750 lâmpadas/h.
- Área requerida: 35 m².
- Ar comprimido: 6 m³.h⁻¹, 6 bar.
- Diâmetro dos bulbos: 32 a 130 mm.
- Comprimento da lâmpada: 130 a 320 mm.

4.3.3 – Estado da arte sobre reciclagem de lâmpadas de mercúrio

A reciclagem de lâmpadas começou a ter um incremento maior no início da década de 90, graças, principalmente aos programas de conservação de energia e incentivos ao desenvolvimento tecnológico nessa área. A atividade em si possui um elevado grau de desenvolvimento tecnológico, com dezenas de patentes registradas e recicladoras espalhadas em diversos países da Europa, América e Ásia.

4.3.3.1 – Panorama mundial

Nos EUA

Em um estudo preparado para a Usepa (1994), foi estimado que aproximadamente 600 milhões de unidades de lâmpadas eram descartadas cada ano e somente 2% eram recicladas. Atualmente, de um descarte da ordem de 802,770 milhões de unidades (Usepa 1997a), são recicladas anualmente 12 a 15% (Nema 2000). A reciclagem de lâmpadas nos EUA é uma atividade em franca ascensão. Dois fatos básicos contribuem para isso: elevado volume de resíduo gerado anualmente e existência de uma legislação ambiental, que foi amplamente discutida por toda a sociedade (fabricantes, pesquisadores, recicladores, geradores de resíduos etc.). Existem em operação dezenas de recicladoras para tratamento dos resíduos de lâmpadas, as quais foram incentivadas a desenvolver tecnologias a partir do *Green Lights Program* de conservação de energia (substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes). O ônus pela reciclagem é suportado pelos geradores de resíduos. Excluem-se desta categoria os pequenos geradores dos setores residencial e comercial (Association of Lighting and Mercury Recyclers 2000).

A Nema espera que a taxa atual de reciclagem tenha um incremento de mais de 60% nos próximos anos, em decorrência da implementação da nova legislação aprovada no final de 1999 (Nema 2000).

Na Europa

Na grande maioria dos países da Comunidade Européia existe uma conscientização ambiental muito clara e bem difundida sobre os impactos causados pelo descarte indiscriminado de lâmpadas de mercúrio ao fim de sua vida útil, havendo legislações específicas inclusive contemplando o manuseio desses resíduos. A situação pode ser visualizada na Tabela 4.16 (MRT 1999). Cerca de 369 milhões de unidades de lâmpadas são descartadas anualmente, das quais 122 milhões são recicladas (média de 33%).

A reciclagem de resíduos de lâmpadas de mercúrio é uma atividade em operação ou em vias de operação em 63% dos países relacionados na Tabela 4.16, com taxas que podem alcançar 50,0% em países como a Alemanha, Áustria, Bélgica e Suécia, 83,3% na Holanda e 87,5% na Suíça. O ônus pela reciclagem, na grande maioria dos países, ao contrário do que acontece nos EUA (usuário poluidor), não recai sobre o gerador do resíduo, mas sim sobre o fabricante (fabricante poluidor). Na Espanha, Finlândia e Suíça a responsabilidade pela reciclagem é do gerador (usuário poluidor).

Tabela 4.16 – Descarte e reciclagem de lâmpadas de mercúrio em alguns países da Europa.

País	Descarte anual (milhões de tubos)	Reciclagem anual (milhões de tubos)	Taxa de reciclagem (%)
Alemanha	100,0	50,0	50,0
Áustria	10,0	5,0	50,0
Bélgica	12,0	6,0	50,0
Dinamarca	5,0	2,0	40,0
Espanha	35,0	5,0	14,3
Finlândia	10,0	3,0	30,0
França	50,0	5,0	10,0
Holanda	24,0	20,0	83,3
Itália	45,0	5,0	11,1
Noruega	6,0	2,0	33,3
Reino Unido	50,0	5,0	10,0
Suécia	14,0	7,0	50,0
Suíça	8,0	7,0	87,5

Fonte: (MRT 1999)

Em diversos países a coleta e o transporte de lâmpadas usadas/queimadas (intactas), são feitos por meio da distribuição reversa, situação em que o usuário devolve a lâmpada usada no local onde ela foi comprada, o vendedor a devolve ao distribuidor e assim por diante, até chegar ao fabricante (início da cadeia de distribuição do produto). A idéia da distribuição reversa funciona muito bem em países com consciência ambiental já consolidada, distâncias de transporte relativamente reduzidas e simplicidade na estrutura de comercialização. A experiência com a distribuição reversa nos EUA não foi bem sucedida, em decorrência da complexidade no sistema de distribuição/comercialização (Nema 1994).

Na Alemanha, a Osram foi a primeira fabricante de lâmpadas a desenvolver um sistema de reciclagem, em meados da década de 80. A matéria-prima obtida das lâmpadas usadas é reutilizada na manufatura de novas lâmpadas fluorescentes (reutilização de 93%, ao invés de 100% de descarte no lixo). Atualmente existe uma rede de 9 recicladoras de lâmpadas fluorescentes com apoio da associação alemã de fabricantes de lâmpadas Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung (AGLV) (Osram 1998).

No Canadá

No Canadá, a indústria de reciclagem está resumida em poucas iniciativas isoladas. A maior indústria de reciclagem trabalha com 500.000 lâmpadas fluorescentes/ano. Em seu processo de reciclagem, o pó de fósforo é enviado aos EUA para destilação do mercúrio contido. Das 35 tecnologias inventariadas, somente 8 estão em desenvolvimento (Fluorescent Lamp Recyclers Inc 1998).

No Brasil

No Brasil, são produzidas anualmente 48,5 milhões de unidades de lâmpadas de mercúrio (Abilux 1998) e descartadas em igual número, o que dá um descarte *per capita* da ordem de 0,3 lâmpadas. Praticamente, todo o resíduo é jogado diretamente no lixo. Apenas uma pequena parcela desse volume é tratada pela atividade de reciclagem. Esta é uma atividade voluntária, que alcança somente 3% do volume descartado e tem seu ônus suportado pelo gerador do resíduo (Apliquim 1999). Dados mais recentes dão conta que o volume descartado gira em torno de 80 milhões de unidades/ano e o reciclado já está no patamar de 1.893.451 unidades/ano (taxa de reciclagem de 2,37%). O volume reciclado envolve 991 clientes cadastrados, o que corresponde a 1.911 lâmpadas/cliente (Apliquim 2001). A reciclagem é praticada por empresas que possuem um sistema de gestão ambiental já implantado e por empresas interessadas na certificação das Normas ISO 14.000, na maioria dos casos empresas exportadoras. O mercado brasileiro está concentrado, praticamente, em uma única recicladora - Apliquim Equipamentos e Produtos Químicos Ltda., localizada em Paulínea (SP), que utiliza processo térmico para recuperação do mercúrio contido nos resíduos. Outras iniciativas estão começando a aparecer: uma, em Curitiba (PR), baseada no processo químico (Mega Reciclagem 2000), outra, em São Paulo, a qual incorpora os resíduos de lâmpadas na fabricação de tijolos de cimento (Ecoblock 2000) e Naturalis do Brasil, que está trazendo para o Brasil a tecnologia *bulb eater (drum top crusher)*.

4.3.3.2 - Empresas recicladoras

Na Tabela 4.17 encontram-se relacionadas as principais empresas recicladoras de lâmpadas de mercúrio, localizadas nos EUA, Canadá, Alemanha e Brasil.

4.3.3.3 - Custos de reciclagem e valoração dos subprodutos de reciclagem

O custo de reciclagem, visando à descontaminação de lâmpadas de mercúrio, depende do volume a ser reciclado, distância entre o gerador e a usina de reciclagem, serviços específicos a serem realizados e natureza do próprio cliente (se privado, público etc).

Atualmente, existem dois posicionamentos quanto ao seu ônus:

- ônus por conta do gerador de resíduos – gerador pagador (situação que prevalece, por exemplo, nos EUA, no Canadá, em alguns países da Europa e Brasil) e
- ônus por conta dos fabricantes de lâmpadas – fabricante poluidor (situação existente na maioria dos países da Europa).

Tabela 4.17 -Principais fabricantes de equipamentos e recicladoras nos EUA, Europa e Brasil.

Empresa recicladora	País de origem
Fluorescent Lamp Recyclers Inc. (FLR)	Canadá
St. Lawrence Technologies	Canadá
Advanced Environmental Recycling Company (AERC) ¹	EUA
American Lamp Recycling (ALR) ¹	EUA
Bethlehem Apparatus Co, Inc. ²	EUA
Dynamic Technologies for the Environmental Industry (Dytec) ¹	EUA
Global Recycling Technologies, Inc.	EUA
Lamp Recyclers, Inc.	EUA
Mercury Recovery Services ^{1,2}	EUA
Recyclights	EUA
USA Lights Inc. ¹	EUA
Dekonta Industriedienste GmbH	Alemanha
Osram ^{1,3}	Alemanha
Relux Recycling und Umwelttechnik GmbH	Alemanha
Werec GmbH Berlim Wertstoff	Alemanha
Mercury Recovery Technology ^{1,2}	Suécia
Apliquim	Brasil

Notas:

1 - Fabricante de equipamentos processadores (esmagador/quebrador) e/ou reciclador.

2 - Fabricante de destilador de mercúrio.

3 - Fabricante de lâmpadas de mercúrio.

Nos EUA, o custo de reciclagem para lâmpada fluorescente varia de acordo com o volume a ser reciclado, sendo de USD\$ 1,08 a USD\$ 2,00 para pequenos geradores e USD\$ 0,36 para grandes geradores de resíduos (Portland Herald Press 1997). Para lâmpadas tipo

HID esse custo varia de USD\$ 1,25 a USD\$ 5,00 (Department of Environment, Health and Natural Resource 1997). No Reino Unido, o custo de reciclagem para lâmpada fluorescente é da ordem de 40 p, ou seja, USD\$ 0.67 (Eagle 1997). No Brasil, o custo tanto para lâmpadas fluorescentes como para lâmpadas tipo HID é da ordem de R\$ 0,50 (Apliquim 1999, Mega Reciclagem 2000). A esses custos devem ser acrescentados: frete até a recicladora, reembalagem, seguro de transporte e serviços especiais (coleta, armazenagem e transbordo).

Na Tabela 4.18 encontram-se quantificadas as massas de cada um dos principais componentes de lâmpadas de mercúrio.

Tabela 4.18 – Quantificação dos principais componentes de lâmpadas de mercúrio.

Lâmpada fluorescente (40W)					
Fabricante	Diâmetro mm (polegadas)	Massa total (g)	Alumínio (g)	Pinos (g)	Vidro + miscelânea (g)
Osram	38 (1.½)	291,42	3,54	0,46	287,42
		292,15	2,30	0,45	289,40
GE	38 (1.½)	289,30	2,30	0,45	286,55
GE - EUA	38 (1.½)	279,83	2,20	0,41	277,22
Philips	32 (1.¼)	246,16	2,28	0,32	243,56

Lâmpada a vapor de mercúrio (400 W)					
Fabricante/ Modelo	Massa total	Base	<i>Pellet</i>	Ferro-metals	Bulbo externo + pó
	(g)				
Osram HQL	242,44	36,18	27,66	9,52	169,08
Philips HPLN	250,06	28,22	29,63	14,26	177,95

Notas:

- 1) O pó de fósforo em lâmpadas fluorescentes de 40 W varia de 5 a 6 g, dependendo do diâmetro da lâmpada. A deposição eletrostática desse pó em lâmpadas fluorescentes é da ordem de 4,5 mg.cm².
- 2) O *pellet* de vidro sílica em lâmpadas a vapor de mercúrio de 400 W possui massa da ordem de 32 g.
- 3) GE - General Electric; HQL e HPLN são modelos de lâmpadas

O vidro é o maior constituinte em lâmpadas de mercúrio. Sua massa pode variar de 90 a 95% da massa total em lâmpadas fluorescentes, e de 70 a 75% em lâmpadas HID. Os demais componentes possuem conteúdos variáveis e em menores percentuais. Os subprodutos obtidos no processo de reciclagem, tais como vidro, alumínio, partes ferro-metálicas, pó de

fósforo e mercúrio possuem, conforme relação a seguir, baixo valor agregado individual e, por si só, não justificam a atividade de reciclagem como negócio. A despeito do baixo valor agregado, esses subprodutos têm fácil recolocação no mercado de produtos reciclados:

➤ **Pó de fósforo**

O pó de fósforo pode ser reutilizado na indústria de tintas e/ou como estabilizador de resíduos ácidos em aterros sanitários.

➤ **Vidro**

O vidro soda de lâmpadas fluorescentes tem uma aplicação mais limitada do que o vidro normalmente reciclado, podendo ser reutilizado como material vitrificante na fabricação de pisos em indústrias cerâmicas.

➤ **Alumínio**

O alumínio, existente nos terminais das lâmpadas, pode ser comercializado junto às empresas de reciclagem de sucata de alumínio. Em Belo Horizonte, existem dois compradores: Polimetal e Comercial Dom Pedro. O preço médio é da ordem de R\$ 1.000,00/t.

➤ **Latão**

Os terminais de latão podem ser comercializados em Belo Horizonte pela Comercial Dom Pedro, com preço médio de R\$ 1.000,00/t.

➤ **Mercúrio**

O mercúrio, principal subproduto obtido no processo de reciclagem, tem o preço bastante variável, em função do seu grau de pureza. Para se ter uma idéia, o mercúrio metálico apresenta as seguintes cotações: (a) R\$ 330,00 por frasco de 250 g, produto com elevada pureza (99,99%), utilizado para fins laboratoriais (PA), marca Merck, e (b) R\$ 10,00 para frascos de 100 g, marca Zetec e R\$ 30,00 para frascos de 500 g, marca Cinética (produtos com certo grau de impureza).

4.4 – ESTUDO DE TERMODESORÇÃO DE MERCÚRIO

O objetivo principal desse estudo foi determinar, qualitativamente, as espécies de mercúrio presentes em resíduos de lâmpadas fluorescentes, bem como suas respectivas temperaturas de dessorção. Os estudos apresentados anteriormente nesse mesmo Capítulo sobre caracterização da matriz de pó de fósforo e do vidro, bem como análises de mercúrio total, contribuíram para a discussão e avaliação desse material como resíduo perigoso.

Desde 1904, a técnica de termodessorção de mercúrio tem sido usada para determinação de mercúrio total em minerais provenientes de minas de cinábrio e em prospecção geoquímica (Koksoy 1967, Henry et al. 1972, Aston e Riley 1972, Lidums 1972).

Atualmente, a utilização dessa técnica (chamada de Termo-desorption/Atomic Absorption Spectrometry - TDAAS) vem sendo retomada, principalmente, como uma importante ferramenta em estudos de especiação de mercúrio em matrizes sólidas, uma vez que diferentes espécies de mercúrio termodessorvem a diferentes faixas de temperatura (Goleb 1971, Biester e Nehrke 1997, Windmüller et al. 1996, Biester et al. 2000).

4.4.1 – Abordagem inicial

Dados apresentados pela Nema (Usepa 1997a), em trabalho realizado conjuntamente com a Sylvania (fabricante de lâmpadas), indicam que do mercúrio contido em uma lâmpada fluorescente atual (diâmetro de 1½” = 38 mm), provavelmente 0,2% (0,042 mg) estejam sob a forma de mercúrio elementar (fase vapor) e o restante, de 99,8% (20,958 mg), sob a forma de mercúrio divalente, incorporado no pó de fósforo, Tabela 2.3. A Usepa faz questão de enfatizar, em seu trabalho intitulado *Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps* (1997a), que a especiação do mercúrio contido em lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas é um assunto controverso e complexo.

As controvérsias aparecem documentadas no *Peer Review of the EPA Analytical Model: Mercury Emissions from the Disposal of Fluorescent Lamps* (Usepa 1998d) sobre a aplicação e validação do modelo proposto, que fora concebido para estimar as emissões de mercúrio a partir do descarte de lâmpadas fluorescentes. As dúvidas mais relevantes dizem respeito à especiação do mercúrio contido em lâmpadas fluorescentes. Um dos revisores desse documento argumentou que a concentração de mercúrio elementar da fase de vapor nessas lâmpadas, quando elas não estão eletrificadas, está limitada pela pressão de vapor do metal e isso não pode exceder à pressão de saturação. No ar, a 20 °C, essa quantidade é de cerca de 0,015 mg.L⁻¹ (ou 0,015 mg/lâmpada fluorescente do tipo LF40WT10) e não seria muito diferente em pressão atmosférica fracionada ou no interior de uma lâmpada usada, no meio de gás inerte. A primeira controvérsia aparece aí, pois o conteúdo do mercúrio elementar sob a forma de vapor de 0,042 mg/lâmpada não poderia ser superior a 0,015 mg/lâmpada (Usepa 1997a). Além disso, o mercúrio é adicionado a essas lâmpadas para gerar radiação UV por estimulação elétrica dos átomos de mercúrio elementar no gás contido no interior da lâmpada. Torna-se difícil imaginar porque os fabricantes de lâmpadas adicionariam outras formas de mercúrio além do elementar. Não obstante, é possível que pequenas quantidades de óxido mercuroso possam ser utilizadas para gerar radiação UV-C. Com referência ao conteúdo mínimo de mercúrio em uma lâmpada fluorescente, a Nema tem demonstrado que um insuficiente conteúdo de mercúrio resultará em falha prematura no funcionamento da

lâmpada. Esse fenômeno é chamado de “fome do mercúrio” (*mercury starvation*), no jargão da indústria. A Nema tem clarificado que uma lâmpada fluorescente do tipo F40T12, com vida útil de 20.000 horas, necessita, no mínimo, de 10 mg de Hg (0,7 µL), para assegurar que o mecanismo limitador do tempo de vida seja a depleção da poeira emissiva de elétrons e não o mercúrio. Variações no processo mecânico usado para inserir o mercúrio no interior da lâmpada fluorescente, geralmente requer que o nível de dose média não seja inferior a 15 mg (Usepa 1998f).

Outro assunto de relevância é a interação do mercúrio com os componentes das lâmpadas fluorescentes. Vários trabalhos de pesquisa têm comprovado que existe uma forte interação do mercúrio com o vidro, particularmente com o Na (interação intermetálica) (Dang et al. 1999, Thaler et al. 1995), com Ca, Ba e Sr dos carbonatos alcalinos terrosos (CaCO₃, BaCO₃ e SrCO₃) e Sn (SnO₂), que recobrem os eletrodos (Dang et al. 1999) e difusão de formas oxidadas no interior da matriz vítrea (Doughty et al. 1995).

4.4.2 – Especificação de mercúrio por TDAAS em matriz de pó de fósforo e em vidro

Na Figura 4.16 são mostrados os termogramas da mistura de pó de fósforo utilizada no preparo de amostras dopadas com padrões de mercúrio, antes e após o tratamento térmico. Pode-se observar que o tratamento térmico realizado foi eficiente na remoção do mercúrio, mesmo considerando-se que a massa de pó nesse teste foi muito maior que a utilizada para os termogramas de amostras dopadas.

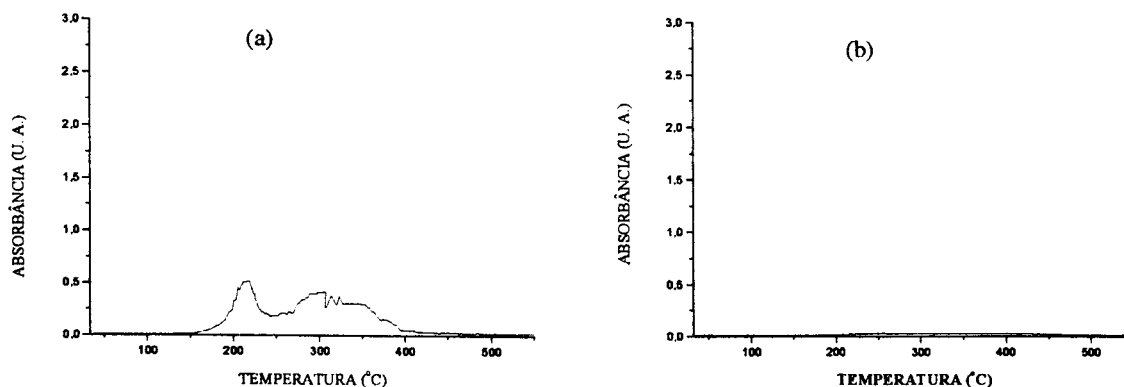


Figura 4.16 - Termogramas de uma mistura de pó de fósforo procedente de diversas lâmpadas fluorescentes: (a) antes do tratamento térmico e (b) após tratamento térmico.

Os termogramas de amostras de pó de fósforo dopadas com padrões de mercúrio apresentam as seguintes características (Figura 4.17):

- Hg⁰ aparece no intervalo de temperatura que vai desde a ambiente até cerca de 180 °C (máximo em, aproximadamente 150 °C); o pico possui conformação aguda (forma leptocúrtica).

- Hg_2Cl_2 aparece de 100 a 250 °C, com máximo em 225 °C; o pico possui uma forma aguda até 250°C, e a de um ombro no intervalo de 250 até 350 °C que mostra alguma oxidação dessa espécie, possivelmente não devido a interações com a matriz, mas à presença dessa espécie oxidada no próprio padrão.
- HgCl_2 apresenta um pico largo (tendência platicúrtica) entre 150 e 340 °C, (máximo em, aproximadamente, 275 °C).
- HgO termodesorve no intervalo de temperatura de 250 a 500 °C, com máximo em aproximadamente 400 °C. A conformação do pico exhibe, também, uma tendência planicúrtica, no intervalo de 380 a 430 °C, e
- HgS exhibe um pico de conformação mais aguda (forma leptocúrtica) em temperaturas variando de 300 a 430 °C (máximo em 400 °C).

Hg^0 e Hg^{1+} podem ter sobreposição em alguma extensão dos termogramas (lado direito), porém os máximos dos dois picos são bem diferenciados, isto é, 150°C para a primeira espécie e 225°C para a segunda. As espécies de Hg^{2+} podem ou não ter sobreposição; a espécie HgCl_2 diferencia-se bastante das espécies HgO e HgS (estas observações permitem diferenciar e separar os diversos estados de oxidação do mercúrio). A fim de verificar alterações (oxiredução) nas amostras dopadas, foram feitas análises temporais com 7, 14, 30 e 45 dias após a dopagem inicial. Os registros não revelaram alterações dignas de nota. Embora o perfil da amostra dopada com HgCl_2 (Figura 4.17) tenha mostrado um pequeno sinal de mercúrio em estado de oxidação (1+), isso, muito provavelmente, não pode ser atribuído a um processo de redução na matriz, mas sim à presença de traços desse composto no padrão utilizado. Na Tabela 4.19 foram relacionadas as principais características das amostras submetidas aos testes de termodesorção. As concentrações de mercúrio total nessas amostras (matriz do pó de fósforo) variaram de $(300 \pm 30) \mu\text{g.g}^{-1}$ a $(13.300 \pm 1.300) \mu\text{g.g}^{-1}$. As maiores concentrações foram verificadas em lâmpadas usadas/queimadas, e o mínimo em lâmpadas novas, o que é de se esperar, pois a interação do mercúrio com a matriz depende de processos físico-químicos (Doughty et al. 1995) e do tempo de uso da lâmpada (Thaler et al. 1995). Os resultados dos testes de termodesorção (Figura 4.18) foram, também, consolidados na Tabela 4.19, o que permitiu correlacionar concentração e espécies de mercúrio existentes na matriz de pó de fósforo. Em termos de estado de oxidação, existe uma nítida tendência de mais de uma espécie em lâmpadas usadas/queimadas. A espécie principal encontrada foi Hg^0 , predominantemente em lâmpadas novas.

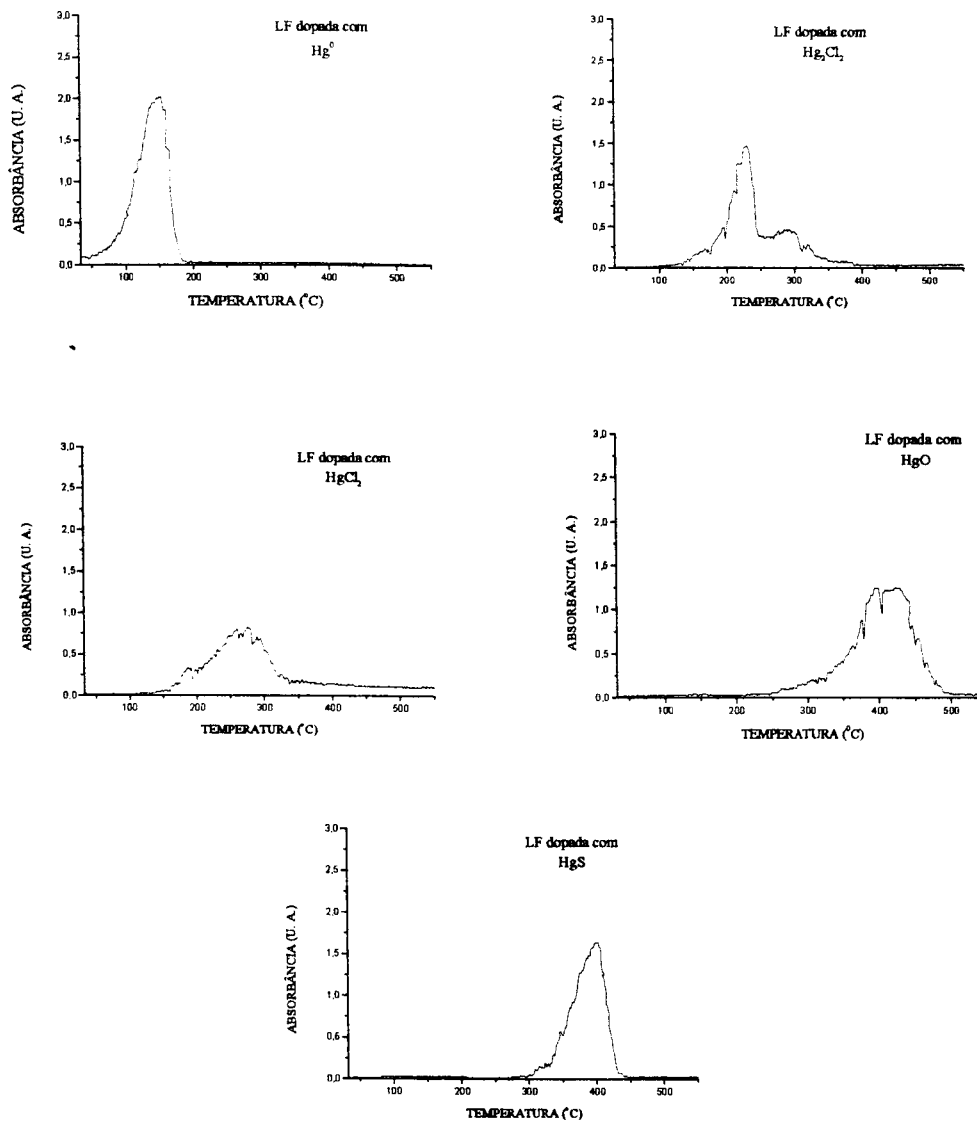


Figura 4.17 - Termogramas de amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes dopadas com padrões de mercúrio.

Em apenas dois casos (LF02 e LF09) foram encontrados somente Hg^{2+} . Curiosamente uma das lâmpadas era nova, caso em que se espera encontrar mercúrio em estado de oxidação mais baixo. Em outros casos foi encontrado principalmente Hg^{1+} - LF05, LF06, LF07. Por vezes foram constatadas as presenças de Hg^0 e Hg^{1+} - LF08, LF10 e LF16. Ainda pela Figura 4.18, observa-se que os perfis das amostras LF03 e LF06 são bastante distintos dos demais e mostram a presença de picos estreitos que não são comparáveis a qualquer padrão de mercúrio, provavelmente devido a alguma interação deste com aditivos presentes nessas lâmpadas e ausente nas demais. Os resultados mostraram a possibilidade de oxidação do mercúrio nesse tipo de matriz, o que é indesejável, pois tanto o Hg^{1+} como o Hg^{2+} formam compostos que podem ser mais facilmente solubilizados e organificados e, conseqüentemente, o descarte desse material como resíduo torna-se muito mais impactante ao meio ambiente do

que compostos pouco solúveis. Parte das espécies de Hg^{1+} e Hg^{2+} podem estar na forma de cloretos, uma vez que a composição química do pó de fósforo (Tabela 4.8) mostra 0,7% de Cl e os perfis das amostras estudadas apresentaram sinais de termodessorção comparáveis aos padrões de Hg_2Cl_2 e HgCl_2 . Quanto ao mercúrio divalente, há trabalhos que sugerem a formação de HgO devido à reação do Hg^0 com o oxigênio livre, gerado pela decomposição de óxidos de metais alcalinos que são volatilizados na zona de descarga elétrica da lâmpada (Foust et al. 1999, Klinedinst et al. 2001). Ao se comparar os termogramas da Figura 4.18 com o termograma da matriz dopada com HgO (Figura 4.17), observa-se que apenas as amostras LF02 e LF03 têm sinais semelhantes a tal óxido.

Atualmente, têm sido depositadas inúmeras patentes nos EUA sobre utilização de agentes complexantes orgânicos (ácido ascórbico - $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$ e gluconato de sódio - $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NaO}_7$ etc.) que podem ser incorporados, durante a fabricação de lâmpadas, na matriz de pó de fósforo e/ou base cimentante. Esses agentes visam reduzir o arraste de mercúrio nos testes de lixiviação (TCLP) ou quando da disposição final dos resíduos (Haitko et al. 1998, Foust et al. 1998). Outra alternativa em estudo é a introdução de um agente antioxidante na estrutura da lâmpada como, por exemplo, ferro (Foust et al. 1999), compostos de manganês, cobre e também haletos (NaCl e NaBr) (Klinedinst et al. 2001), justamente para evitar que o mercúrio metálico seja oxidado a formas mais solúveis. Nesse trabalho, a possibilidade de incorporação desses agentes complexantes e/ou antioxidantes é descartada, pelo menos nas lâmpadas usadas/queimadas estudadas, uma vez que foram fabricadas em datas anteriores às das patentes mencionadas (últimos dois anos). Por outro lado, mesmo considerando-se a possibilidade dessa inovação tecnológica em lâmpadas novas, recém-fabricadas, as modificações deveriam ser mais evidentes. A presença de espécies Hg^{1+} e Hg^{2+} , conforme ficou constatada, torna-se bastante preocupante, pois tais espécies mais solúveis fazem com que muitas lâmpadas sejam reprovadas em testes de classificação de resíduos. É importante ressaltar e ratificar que o limite regulatório brasileiro de 100 mg de mercúrio por kg de massa bruta de resíduo ou $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ em testes de lixiviação (ABNT 1987a) é muito conservador e, esse último, corresponde à metade do limite norte-americano, que é de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ em testes TCLP (Usepa 1999, Usepa 2000). Os resultados de concentração de mercúrio na matriz de pó de fósforo exibidos na Tabela 4.19, ajustados primeiro à massa do pó de fósforo contido em uma lâmpada fluorescente tubular de 40W (4 a 6 gramas), e, segundo, à massa total de cada lâmpada (média de 275 g), revelam que o conteúdo de mercúrio excede o limite regulatório brasileiro como, por exemplo, os resíduos representados pelas amostras LF02, LF04, LF05 e LF06 (conforme apresentado neste mesmo capítulo em 4.2.2.2).

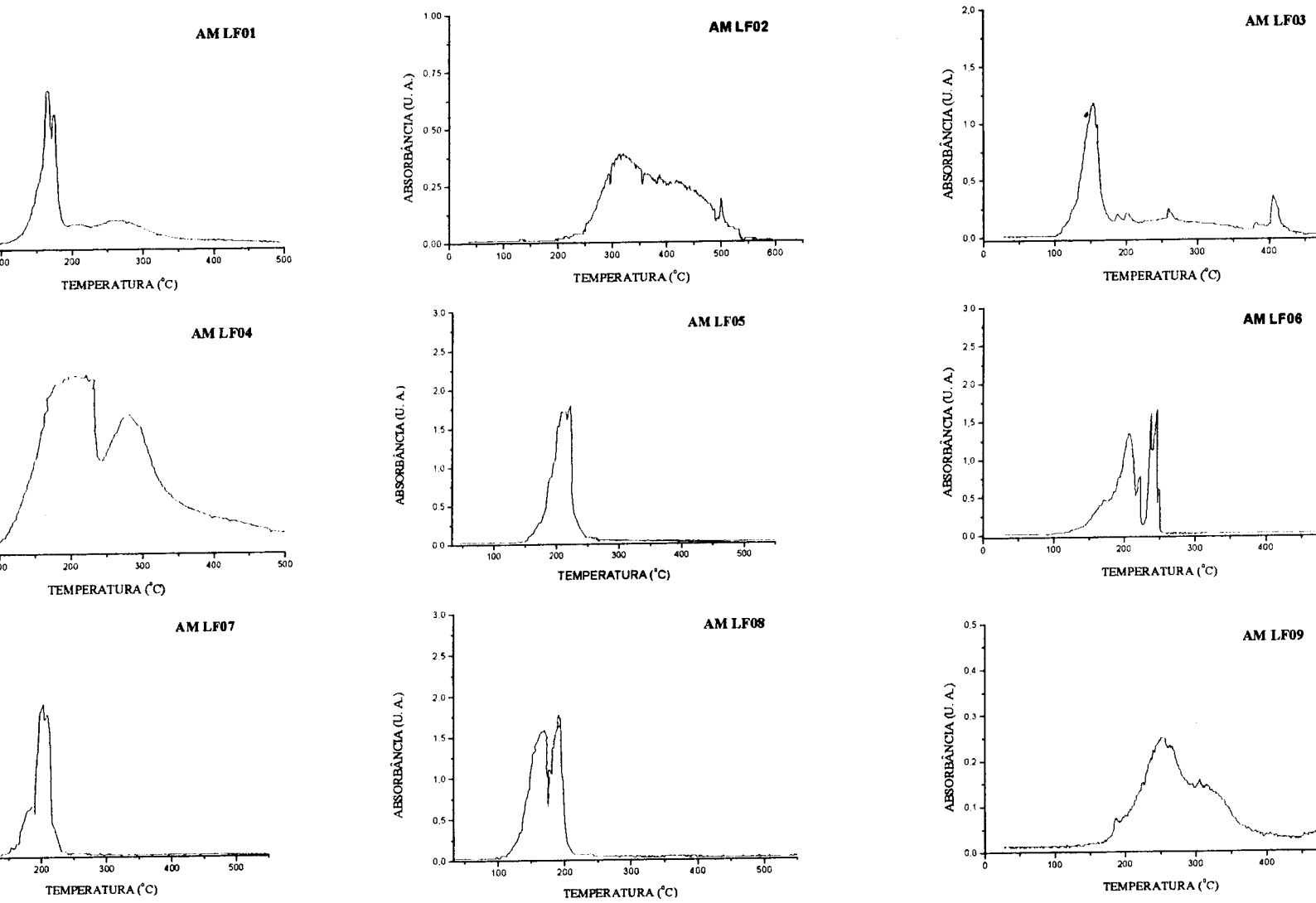


Figura 4.18 - Termogramas de amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes.

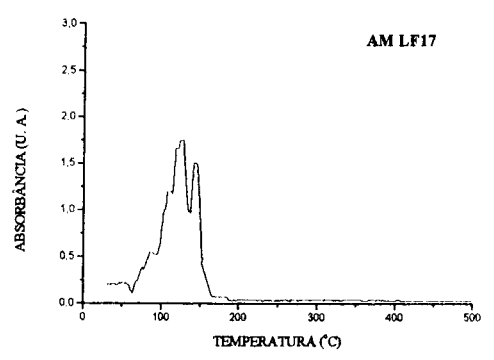
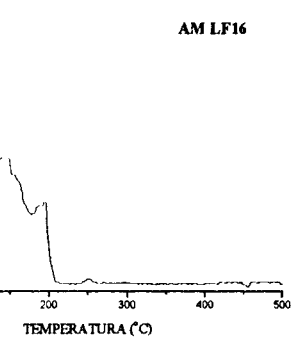
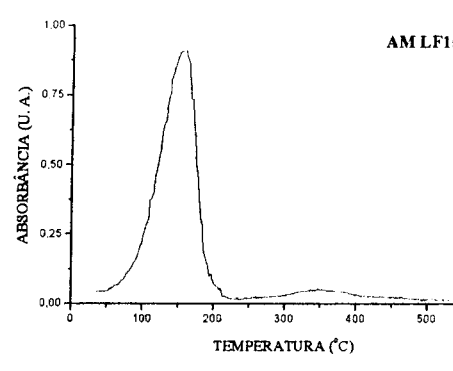
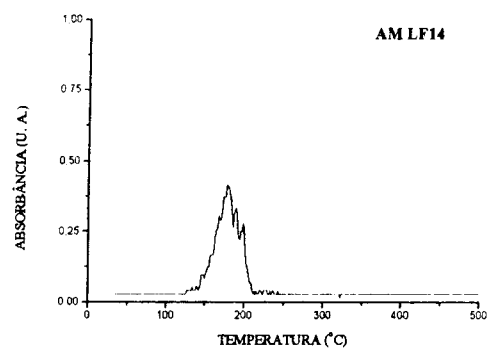
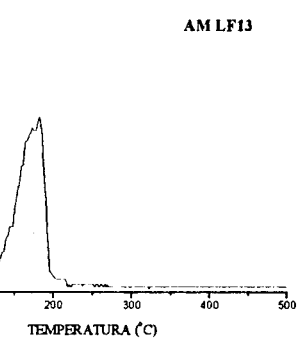
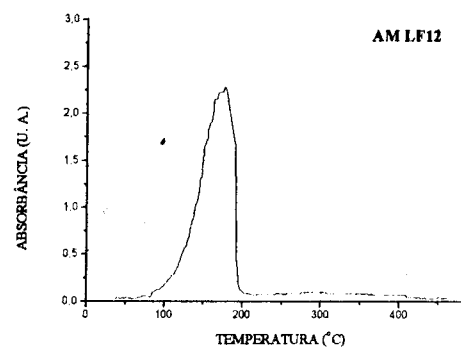
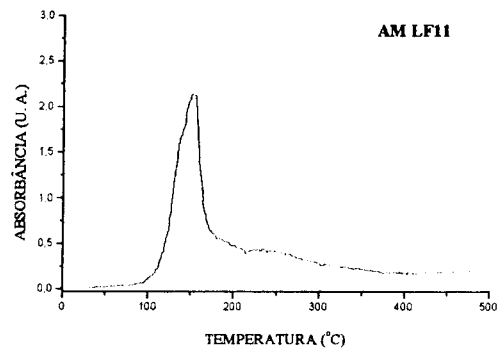
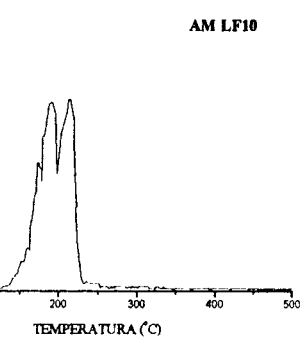


Figura 4.18 - Termogramas de amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes (continuação).

Tabela 4.19 – Características das amostras submetidas aos testes de TDAAS, concentração e especiação do Hg contido em pó de fósforo e vidro de lâmpadas fluorescentes tubulares usadas/queimadas e novas.

Amostra	Descrição	Concentração de Hg ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Espécie de mercúrio	
			Principal	Secundária
Pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas				
LF01	F40T12/LDP	4.000 \pm 400	Hg ⁰	Hg ¹⁺ ; Hg ²⁺
LF02	F40T12/LDP	8.900 \pm 900	Hg ²⁺	
LF03	F40T12/LD/U	3.500 \pm 400	Hg ⁰	Hg ¹⁺ ; Hg ²⁺
LF04	F40T10/ELD	6.300 \pm 600	Hg ⁰ ; Hg ¹⁺	Hg ²⁺
LF05	F40T12/LDE	6.700 \pm 700	Hg ¹⁺	
LF06	F40T12/LDE	13.300 \pm 1.300	Hg ¹⁺	Hg ⁰ ; Hg ²⁺
LF07	F40T12/ELD	3.600 \pm 400	Hg ¹⁺	Hg ⁰
LF13	F40T12/SLD, Duramax	1.430 \pm 130	Hg ⁰	
LF15	F40T10/LDE	2.100 \pm 200	Hg ⁰	Hg ²⁺
LF17	F20T12/SLD, Duramax	1.700 \pm 150	Hg ⁰	Hg ¹⁺
Mínimo: 1.430 \pm 130 Máximo: 13.300 \pm 1.300				
Pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes novas				
LF08	F40T12/SLD, Duramax	750 \pm 80	Hg ⁰ ; Hg ¹⁺	
LF09	F40T10/LDE	330 \pm 30	Hg ²⁺	
LF10	F40T12/SLD, Duramax	760 \pm 80	Hg ⁰ ; Hg ¹⁺	
LF11	F40T12/SLD, Duramax	800 \pm 50	Hg ⁰	Hg ²⁺
LF12	F40T12/SLD, Duramax	750 \pm 60	Hg ⁰	
LF14	F40T10/LDE	300 \pm 30	Hg ⁰	Hg ¹⁺
LF16	F20T12/SLD, Duramax	950 \pm 40	Hg ⁰	Hg ¹⁺
Mínimo: 300 \pm 30 Máximo: 950 \pm 40				
Vidro soda de lâmpada fluorescente				
Amostra	Descrição	Concentração de Hg (ng.g^{-1})	Espécie de mercúrio	
V1	Lâmpada usada/queimada	4.300 \pm 400	Possivelmente Hg ¹⁺ ; Hg ²⁺	
V2	Lâmpada nova	18 \pm 2	-	
Método de análise: Espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio (CV-AAS).				

Os resultados mostram, ainda, uma forte tendência a que as concentrações mais elevadas de mercúrio ocorram em situações onde prevalecem formas oxidadas, seja com Hg^{1+} , isoladamente, seja com Hg^{2+} ou com ambas. Há de se comentar, ainda, que não foram observadas curvas de dessorção de Hg comparáveis ao padrão de HgS. Isto justifica-se, pois o pó de fósforo não contém enxofre em sua composição química.

Outro resultado importante é mostrado pelo termograma da Figura 4.19, em matriz de vidro de lâmpada usada/queimada, com concentração de mercúrio de $(4.300 \pm 400) \text{ ng.g}^{-1}$. A dessorção do mercúrio foi registrada no intervalo de 240 a 800 °C (tendência de queda de temperatura), com pico máximo em 618 °C. Esse intervalo de temperatura não é comparável a qualquer padrão específico de mercúrio conhecido. Dang et al. (1999) sugerem uma ligação intermetálica entre o Na presente no vidro e o Hg, ou seja, Hg no estado de oxidação zero. Já Doughty et al. (1995) postulam que dentro da lâmpada ocorrem reações eletroquímicas, entre elas a oxidação do mercúrio, devido à formação de um plasma. O mercúrio oxidado é capaz de se difundir no interior da matriz vítrea. Doughty e colaboradores afirmam ainda que o sinal de Hg não é comparável ao padrão do tipo HgO. O termograma apresentado na Figura 4.19 parece concordar, em parte, com a hipótese de Doughty et al., pois o sinal aparece somente após 200 °C, que é uma característica de espécie oxidada. A ocorrência de registros de espécies oxidadas (Hg^{1+} e Hg^{2+}) em matriz de pó de fósforo, conforme mostrado nesse trabalho, representa um forte argumento de que essas espécies, e não o Hg^0 , se ligam ao vidro. No caso de vidro de lâmpada nova, com concentração de mercúrio de $(18 \pm 2) \text{ ng.g}^{-1}$, o sinal de absorbância foi praticamente nulo para uma massa de amostra igual à utilizada no teste com lâmpada usada/queimada (200 mg), o que mostra, mais uma vez, que a interação do mercúrio é proporcional ao tempo de uso da lâmpada, mais precisamente à raiz quadrada desse tempo (Thaler et al., 1995) e à processos físicos-químicos que ocorrem no interior da mesma (Doughty et al. 1995).

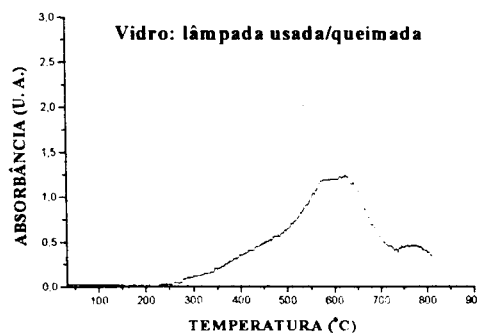


Figura 4.19 - Termograma de amostra de vidro de lâmpada fluorescente usada/queimada.

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

A partir dos dados obtidos nesta Tese, apresenta-se neste capítulo um estudo de viabilidade econômico-financeira para implantação de uma usina de reciclagem de lâmpadas de mercúrio no Brasil. Essa usina teria como enfoque principal a recuperação do mercúrio pelo processo térmico. Para tal, foram feitas as seguintes considerações:

- ❖ A reciclagem de lâmpadas é uma atividade em franca expansão, não somente nos países industrializados como também nos países em desenvolvimento, onde esta atividade começa a ser uma exigência de empresas colimadas com as mudanças adaptativas à nova ordem mundial (mentalidade ambientalista).
- ❖ Existe uma lacuna na legislação ambiental brasileira, o que tem contribuído para a contaminação de ecossistemas e, certamente, produzido efeitos deletérios à saúde humana. Em 1998, a taxa de descontaminação dos resíduos de lâmpadas fluorescentes foi de apenas (3%).
- ❖ Na Brasil, a descontaminação de resíduos de lâmpadas (de-mercurização) é feita, praticamente, por uma única empresa. O mercado comporta e exige outras iniciativas a fim de aumentar o nível de concorrência nesse setor.
- ❖ As empresas geradoras desses resíduos demandam por serviços diferenciados e eficientes, com adoção de tecnologias modernas e seguras e que não as comprometam por ocasião das auditorias ambientais. O advento da implantação da certificação ISO 14.000, particularmente de sistemas de gerenciamento ambiental, tem contribuído para o aumento da consciência no que concerne à contaminação ambiental, e exige que as empresas tenham um sistema controlado de descarte de seus resíduos.

Para subsidiar a análise econômica-financeira propriamente dita foram necessários estudos adicionais sobre: (1) opções de localização; (2) estratégias a serem adotadas; (3) logística de trabalho; (4) equipamentos necessários (seleção), estimativas de custos e infraestrutura básica; (5) estimativa do quantitativo a ser reciclado; (6) estrutura organizacional e (7) cronograma para implantação de uma usina de reciclagem.

5.1 – OPCÕES DE LOCALIZAÇÃO

A localização de uma unidade de reciclagem de lâmpadas deve ser planejada levando-se em consideração a potencialidade de geração de descarte. Quatro pontos básicos devem ser analisados: densidade populacional, grau de industrialização, posicionamento geográfico estratégico e índice de potencial de consumo da região. A análise desses pontos básicos indica a região sudeste do Brasil como a localização mais favorável, pois concentra 40,9% da população do Brasil, 59,1% do consumo de eletricidade (Ministério de Minas e Energia 1998) e mais de 60% da produção industrial de todo o país (Gazeta Mercantil 1998).

Três áreas situadas na região sudeste (São Paulo–Rio de Janeiro–Belo Horizonte) saltam à vista pelo fato de possuírem os maiores municípios do país, as maiores aglomerações de municípios a eles conurbados e o maior grau de industrialização, Tabela 5.1. Além do mais, nesse espaço geográfico de expansão surge a primeira megalópole do Brasil, no eixo Rio-São Paulo, com população da ordem de 35 milhões de habitantes (IBGE 2001).

TABELA 5.1 – População do município central e das regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Região metropolitana	Número de municípios	População total	População do município central
São Paulo	39	17.833.511	10.406.166
Rio de Janeiro	18	10.438.840	5.850.544
Belo Horizonte	33	4.330.680	2.229.697

Nota

Base de dados: Censo 2000 (IBGE 2001)

O polígono que circunscreve essas áreas é representado por um triângulo isósceles, onde os lados iguais são representados pelas distâncias em linha reta (aproximadamente = 325 km) de Belo Horizonte-Rio e Rio-São Paulo. A distância em linha reta entre São Paulo e Belo Horizonte é de 475 km, Figura 5.1.

A definição exata para a localização de uma usina de reciclagem de lâmpadas vai depender também da estratégia a ser implantada/implementada e do grau de investimento no negócio. Embora exista, praticamente uma única empresa trabalhando com reciclagem de lâmpadas na região de São Paulo, o volume de lâmpadas descartado mensalmente na Região Sudeste apresenta condições potenciais muito favoráveis ao estabelecimento de nova(s) unidade(s) de reciclagem.

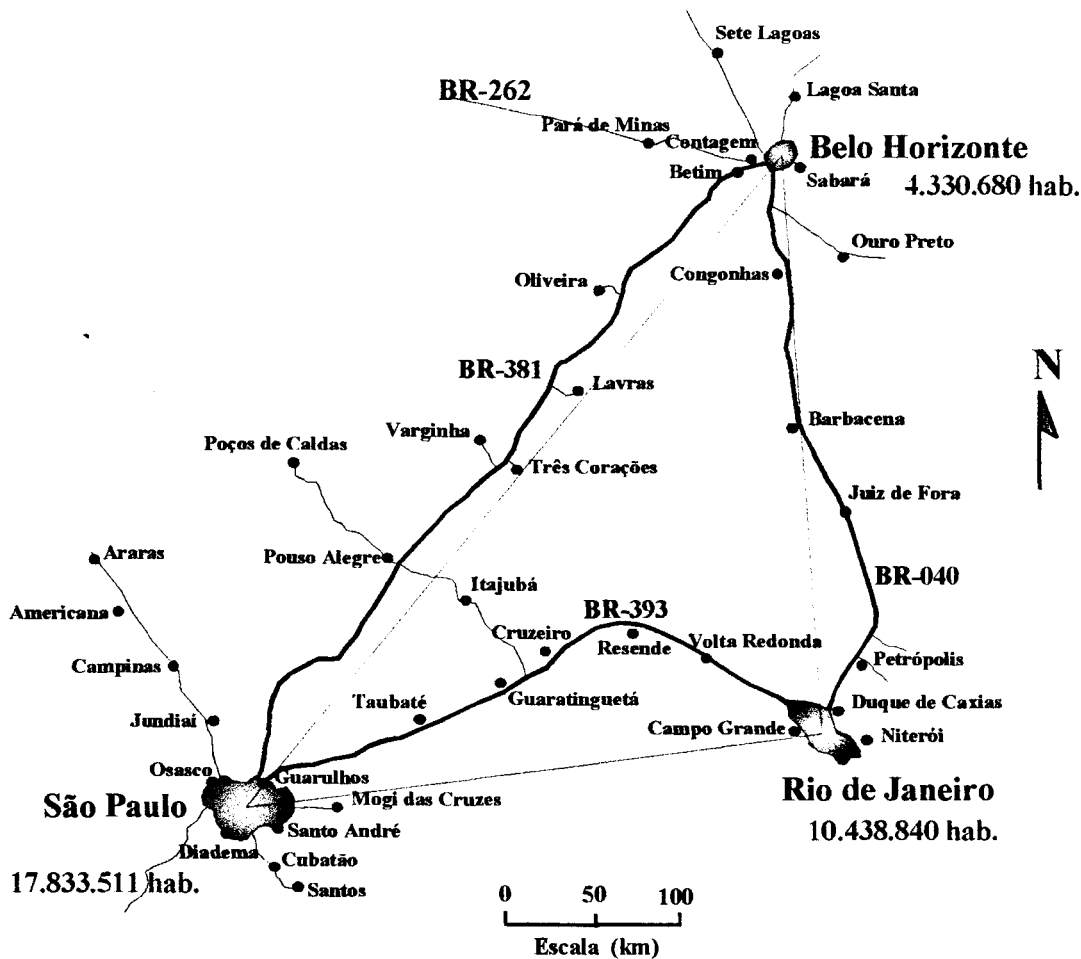


Figura 5.1 – População e posicionamento geográfico das regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

5.2 - ESTRATÉGIAS A SEREM ADOTADAS

Levando-se em consideração os fatores retromencionados, torna-se extremamente importante atentar para estratégias capazes de alavancar e consolidar a atividade de reciclagem de lâmpadas. A seguir são apresentadas três estratégias, que devem ser analisadas e levadas em consideração pelo investidor interessado no empreendimento:

Estratégia 1

Montar uma usina de reciclagem, modulada em pelo menos duas etapas de implementação, visando atender ao mercado situado nas três áreas metropolitanas supracitadas.

Etapa 1

Estruturar uma usina (matriz) com unidades fixas de esmagamento e de destilação, ambas posicionadas, estrategicamente, na região metropolitana de São Paulo.

Etapa 2

Acrescentar duas outras unidades fixas de esmagamento, visando atender aos mercados situados nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Essas unidades poderiam ser fabricadas no mercado nacional, tendo como parâmetro/modelo a unidade adquirida no mercado externo. O processo de destilação seria em uma unidade fixa, posicionada na região metropolitana de São Paulo, e processaria o pó de fósforo proveniente das duas subunidades (filiais).

Estratégia 2

Montar uma usina de reciclagem, modulada em pelo menos duas etapas de implementação, visando atender ao mercado situado nas três áreas metropolitanas supracitadas:

Etapa 1

Estruturar uma usina (matriz) com unidades fixas de esmagamento e de destilação, posicionadas, estrategicamente, na região metropolitana de São Paulo;

Etapa 2

Numa etapa posterior, acrescentar uma unidade móvel de quebra/esmagamento, visando atender, preferencialmente, os mercados situados nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Essa unidade de esmagamento adicional poderia ser fabricada no mercado nacional, tendo como modelo a unidade adquirida no mercado externo. A unidade fixa de destilação posicionada na região de São Paulo processaria o pó de fósforo proveniente desta subunidade móvel.

Estratégia 3

Montar uma usina de reciclagem visando atender o mercado situado na região metropolitana de Belo Horizonte e depois expandir as atividades para os mercados de São Paulo e Rio de Janeiro. Por ser uma estratégia conservadora e mais tímida apresenta risco, pois possibilitaria a entrada de concorrentes que, certamente, iriam explorar o mercado paulista (maior gerador de resíduos de lâmpadas). Quanto a este aspecto, cabe aqui mencionar o interesse apresentado por diversas empresas recicladoras, principalmente dos EUA (AERC) e da Alemanha (Werec GmbH Berlim Wertstoff), empresas estas com larga experiência na área de reciclagem de lâmpadas em seus países de origem.

5.3 - LOGÍSTICA DE TRABALHO

Qualquer que seja a estratégia a ser adotada, um dos fatores de grande importância para o sucesso do empreendimento é a logística de trabalho a ser implantada e implementada

para o atendimento aos clientes. Unidades coletoras de lâmpadas (*containers*) devem ser negociadas com as indústrias/órgãos públicos ou colocadas à disposição para recolhimento das lâmpadas descartadas. Assim que essas unidades atingirem sua plena capacidade, a recicladora poderá ser imediatamente acionada pelo interessado (cliente). Existe a possibilidade de se realizar a primeira fase do processo diretamente nas dependências do cliente, por uma unidade móvel de esmagamento/quebramento. Isso permitiria uma redução sensível no volume dos resíduos a serem tratados, com conseqüências diretas na redução de custos de transporte e outros serviços (manejo, armazenagem e seguro de transporte). Assim que o processo de quebramento/esmagamento de lâmpadas estiver concluído, o vidro e o metal (subprodutos) poderão ser prontamente enviados às recicladoras correspondentes. Somente o pó de fósforo seria levado à usina de reciclagem para a destilação e separação do mercúrio contido. O cliente receberia, de imediato, o certificado de descontaminação correspondente ao volume gerado em sua instalação. Essa modalidade de prestação de serviços, ainda não disponível no Brasil, poderá constituir-se no diferencial a ser oferecido na prestação de serviços e será, certamente, fator determinante para o sucesso do empreendimento.

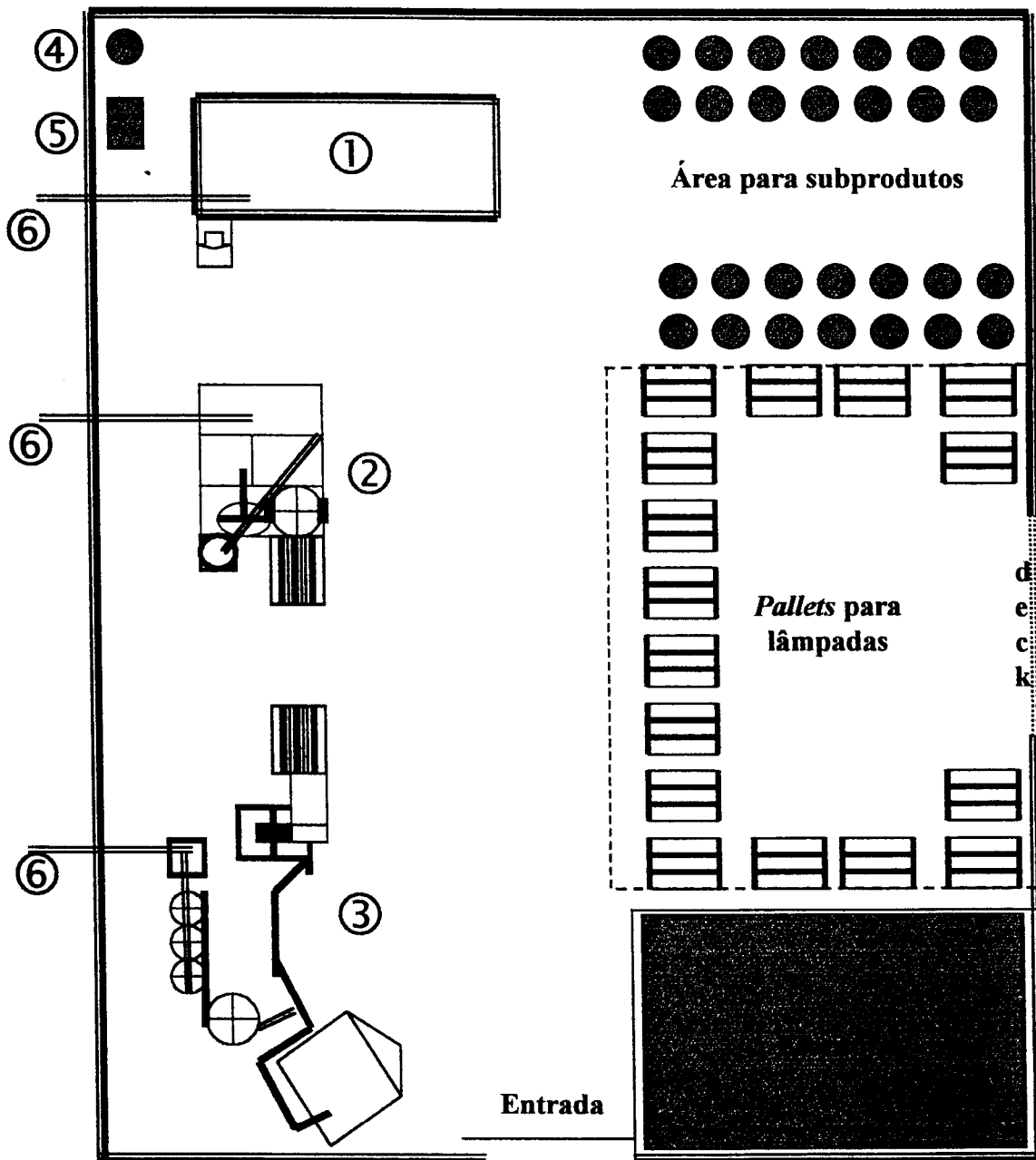
5.4 – EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS E ESTIMATIVAS DE CUSTOS

Uma usina típica para reciclagem de lâmpadas de mercúrio deve ter, no mínimo, os equipamentos e materiais acessórios descritos na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Relação de equipamentos/materiais necessários a uma usina de reciclagem de lâmpadas.

Equipamentos/Materiais	Equipamentos/Materiais
Processador de lâmpadas fluorescentes	Extintores de incêndio
Processador de lâmpadas de descarga	Equipamentos de segurança
Unidade de destilação	Sinalização de advertência
Tambores/caçambas para subprodutos	Luvas, botas e óculos protetores
Barris para material destilado	Ferramentas
Analizador de mercúrio “Jerome R431X”	Materiais de limpeza
Caminhão	Computador/impressora e calculadora
Pick-up (caminhonete)	Telefone/fax
Guincho e eleva tambores	Suprimentos para escritório
Macaco hidráulico	Móveis para escritório
Máquina de solda elétrica	Ar condicionado para escritório
Compressor de ar	Placa de identificação
Equipamento para limpeza de transbordos (lavadora de pressão)	Peças de reposição para processadores e unidade de destilação

Os processadores devem ser instalados em um galpão industrial, com *layout* esquemático, conforme mostrado na Figura 5.2.



Legenda

- | | |
|---|---------------------------|
| 1 - Processador de lâmpadas fluorescentes | 4 - Vaso de ar comprimido |
| 2 - Unidade de destilação | 5 - Compressor de ar |
| 3 - Processador de lâmpadas de descarga | 6 - Exaustor |

Figura 5.2 – Arranjo geral para os equipamentos em uma usina de reciclagem de lâmpadas

O piso deve ser reforçado, principalmente nas áreas de circulação de caminhões/empilhadeiras e baias (boxe) para depósito de lâmpadas e subprodutos, revestido com espessa cobertura em tinta epoxi ou similar, em áreas previamente delimitadas. Sobressaltos reforçados devem ser feitos nas áreas destinadas ao assentamento dos processadores e unidade de destilação. A instalação deve ser provida de um sistema de ventilação geral; na unidade de destilação, o compressor deve ser equipado com uma unidade de secagem para prevenir a condensação de água no sistema de alta pressão de gases (oxigênio e nitrogênio).

5.4.1 - Estimativa de custos e seleção de equipamentos

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 encontram-se relacionados os custos aproximados para a aquisição de equipamentos novos (importados e nacionais). O total geral (subtotal₁ + subtotal₂) é da ordem de R\$ 2.394.250,00.

Tabela 5.3 - Custo de equipamentos importados.

Discriminação	Quantidade	Custo	
		R\$	USD\$
Processador de lâmpadas fluorescentes*	01	1.257.750	585,000
Processador de lâmpadas de vapor*	01	141.900	66,000
Unidade standard de destilação**	01	881.500	410,000
Analizador de mercúrio "Medidor Jerome 431X"*	01	17.200	8,000
Subtotal ₁		2.298.350	1,069,000

Notas:

- 1) Equipamentos importados, com taxa de importação, transporte e seguro inclusos, preço CIF - Belo Horizonte;
- 2) * II + ICMS + IPI + desembaraços alfandegários + taxa administração = 46,3%;
- 3) ** II + ICMS + IPI + desembaraços alfandegários + taxa de administração = 57,7%;
- 4) Conversibilidade de moedas em 06/04/2001: USD 1.00 = R\$ 2,15.

Nesta estimativa foram considerados os preços dos processadores e unidade de destilação fabricados pela empresa MRT. A seleção foi feita levando-se em consideração os seguintes fatores:

- (1) a MRT é, praticamente, a única empresa fabricante que comercializa, de forma integrada, equipamentos para as fases de quebramento/separação dos subprodutos e destilação do pó de fósforo;
- (2) estes equipamentos, diferentemente dos demais, possuem certificados de funcionamento e excelência comprovados por clientes e fabricantes de lâmpadas, espalhados pelos mercados da América do Norte, Europa e Ásia;

- (3) o Processador C/S, montado no interior de um container de 6,10 metros de comprimento (20 pés), possui uma característica muito especial que é a de permitir o trabalho como uma unidade móvel, pois pode ser montado em cima de um caminhão, diferenciando-se, assim, dos outros processadores disponíveis no mercado internacional, que são bem mais pesados, compridos e estacionários. Esta alternativa poderá proporcionar maior mobilidade em operações, principalmente quando se considera a necessidade de prestação de serviços a clientes potenciais, muitas vezes localizados em regiões a mais de 1.000 km de distância da usina central; e
- (4) os processadores concorrentes, tanto da AERC, como da Dytec possuem custos na mesma ordem de grandeza daqueles da MRT, mas não possuem as vantagens elencadas acima.

5.4.2 - Estimativa de investimento em infra-estrutura

Conforme arranjo geral apresentado na Figura 5.2, o terreno para a instalação de uma usina de reciclagem padrão deve ter uma área de 1.200 m² (30 m x 40 m), incluindo o galpão industrial, áreas externas para manobras de caminhões, carga e descarga, estocagem de subprodutos e pátio para estacionamento de clientes.

O galpão industrial para a usina de reciclagem deve ter uma área interna de 400 m² (16,0 m x 25,0 m), onde poderão ser instalados equipamentos (processador de lâmpadas fluorescentes, processador de lâmpadas de descarga e unidade de destilação) e construídos boxes para acondicionamento de lâmpadas a serem recicladas, áreas para armazenamento de subprodutos e escritório administrativo. As especificações desse galpão devem ser as seguintes: estrutura metálica, fechado com alvenaria de blocos 020, pé direito de 6m de altura, cobertura com telhas galvanizadas (com duas caídas para as águas pluviais), sete renovadores de ar no teto, contrapiso em concreto (reforçado para até 6 toneladas nos locais destinados ao assentamento dos processadores, unidade de destilação e áreas de específicas - manobras) e acabamento em tinta epoxi em lugares previamente determinados; escritório interno de 40 m² (10 m x 4 m), em alvenaria e laje, rebocado e pintado, dois banheiros azulejados, piso em cerâmica e divisórias internas. Na Tabela 5.5 encontra-se apresentada uma estimativa de custo para o investimento em infra-estrutura.

Uma alternativa que deve ser levada em consideração é a possibilidade de se conseguir o terreno desejado no distrito industrial do município onde a usina for construída. Isenções e reduções de tributos fiscais devem ser atentamente negociadas nas esferas do governo

estadual e prefeitura municipal, uma vez que um empreendimento desse tipo tem um apelo ambiental muito forte junto à sociedade; além disso, a atividade em si vai possibilitar a reutilização de subprodutos dos resíduos gerados por indústrias, hospitais, comércio, órgãos do governo etc.

Tabela 5.4 - Custo de equipamentos disponíveis no mercado nacional.

Discriminação	Quantidade	Custo (R\$)
Pick-up, fabricação nacional, motor 1.8, para serviços de coleta de lâmpadas	01	20.000,00
Caminhão 3/4, fabricação nacional, capacidade para 4,5 toneladas	01	45.000,00
Guincho hidráulico, capacidade para 500 kg, com rodas de nylon	01	1.800,00
Eleva tambor basculante, capacidade para 300 kg, com rodas de nylon	01	2.000,00
Máquina de solda elétrica, 250 A	01	600,00
Ferramental diverso		2.000,00
Lavadora de pressão a jato	01	500,00
Compressor de ar de 250 L/minuto, 8,3 bar, monofásico	01	1.000,00
Compressor de ar de 1.100 L/minuto, 12 bar, trifásico	01	3.200,00
Condicionador de ar, 10.000 BTU	02	1.800,00
Exaustor de ar, 2.400 m ³ /h, pressão estática de 8 mmH ₂ O	03	600,00
Computador de mesa	03	7.500,00
Impressora HP	01	1.200,00
Calculadora de mesa, com fita	02	300,00
Telefax, com secretária eletrônica	01	500,00
Arquivo	04	1.400,00
Armário	04	2.000,00
Mesa para escritório c/ cadeiras	04	3.000,00
Caçamba para coleta de subprodutos, capacidade de 5 m ³	02	1.500,00
Subtotal ₂		95.900,00

Tabela 5.5 – Estimativa de investimento em infra-estrutura.

Discriminação	Custo (R\$)
Terreno	60.000,00
Terraplenagem	5.000,00
Galpão Industrial	75.000,00
Subtotal ₃	140.000,00

5.4.3 – Estimativa de investimento global

A estimativa de investimentos (subtotal₁ + subtotal₂ + subtotal₃) é da ordem de R\$ 2.534.250,00. As despesas com licenças ambientais (Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação) e relatórios especiais junto ao órgão ambiental competente foi estimada em R\$ 45.750,00. O investimento global será então da ordem de R\$ 2.580.000,00, o que corresponde a USD\$ 1,200,000 (convertibilidade de moedas em 06/abril/2001: USD\$ 1.00 = R\$ 2,15).

O investimento total poderá ser reduzido substancialmente se forem tomadas as seguintes providências/ações:

- negociar junto à prefeitura do município onde for locada a usina a doação do terreno e serviços de terraplenagem, pois a atividade de reciclagem de lâmpadas, além dos empregos diretos e indiretos, tem um apelo sócio-ambiental muito grande. Além do que, o município terá um aumento de receita com arrecadação de impostos sobre a prestação de serviços (de-mercurização de lâmpadas de mercúrio);
- solicitar ao governo estadual (secretaria da fazenda estadual) o diferimento do imposto ICMS incidente sobre equipamentos importados (regime especial para máquinas e equipamentos destinados à integralização de ativo fixo);
- solicitar à Receita Federal a redução do Imposto de Importação (II), já que os equipamentos importados não possuem similares no mercado nacional e destinam-se à descontaminação do meio ambiente.

5.5 - ESTIMATIVA DO QUANTITATIVO A SER RECICLADO

Nos países industrializados, a reciclagem de lâmpadas é uma atividade lucrativa e auto-suficiente porque recicla grandes volumes de lâmpadas e é alavancada pelo tratamento de outros produtos contendo mercúrio (pilhas e baterias, condensadores contendo PCB – bifenil policlorinado, termômetros, amálgamas odontológicos etc.).

O quantitativo a ser tratado mensalmente em uma usina de reciclagem vai depender de uma série de fatores como, por exemplo, investimento, logística, estratégias e foco do mercado. Para dimensionamento deste quantitativo, foram tomados como referência os seguintes parâmetros:

- o descarte de, aproximadamente, 1.320.000 lâmpadas/ano obtido no estudo prospectivo do Estado de Minas Gerais;
- potencial de descarte de 4.137.552 lâmpadas/ano em setores especiais (Capítulo 4.1.2.2 - Indústria de autoveículos, concessionárias do setor elétrico e fabricantes de lâmpadas);
- dimensão do mercado total de lâmpadas a serem recicladas no Brasil: 48,5 milhões de unidades/ano; mercado potencial da Região Sudeste: 26,99 milhões de unidades/ ano (IPC acumulado de 55,649%), Figura 5.3;
- taxa atual de reciclagem no Brasil de 3%, o que corresponde a 1.455.000 lâmpadas/ano.

Na Tabela 5.6 encontram-se postulados alguns cenários para análise de sensibilidade de custo/benefício, os quais foram idealizados com base na Estratégia 2.

Tabela 5.6 – Quantitativo de lâmpadas a ser reciclado mensalmente e anualmente em uma usina.

Cenário	Quantitativo de lâmpadas de mercúrio		
	Mensal	Anual	
1	110.000	1.320.000	
2	330.000	3.960.000	
3	Cenário 2 (3.960.000 unidades/ano)		
	10% de crescimento anual	20% de crescimento anual	25% de crescimento anual

O Cenário 1 foi estimado com base no estudo prospectivo realizado em Minas Gerais e representa, também, a condição mínima de operacionalidade, abaixo da qual ocorrerá uma ociosidade muito grande face ao dimensionamento dos equipamentos selecionados. Por exemplo, o Processador C/S da MRT tem capacidade normal permitida de trabalho de 2.000 lâmpadas por hora, o que representa 352.000 lâmpadas/mês ou 4.224.000 lâmpadas/ano, considerando-se um mês com 22 dias úteis e tempo de operação de 8 horas/dia. O Cenário 2 foi estimado considerando-se que os descartes nas regiões metropolitanas do Rio e São Paulo

sejam da mesma ordem de grandeza daqueles da região metropolitana de Belo Horizonte (somente para efeito de raciocínio, já que é uma grande inverdade, principalmente se forem observadas as populações conurbadas a esses centros e os respectivos potenciais de consumo). O Cenário 3 foi estimado, principalmente, com vistas ao potencial de descarte da Região Sudeste, inclusive com foco nos setores especiais. Para tal, foram postulados três subcenários para uma análise de sensibilidade, ambos com base no Cenário 2 e crescimentos anuais de 10, 20 e 25%.

Por fim, ressalta-se que a opção por este ou aquele cenário vai depender de uma série de fatores. Dentre eles podem ser citados, por exemplo, estratégias a serem colocadas em prática, logística de trabalho e investimentos.

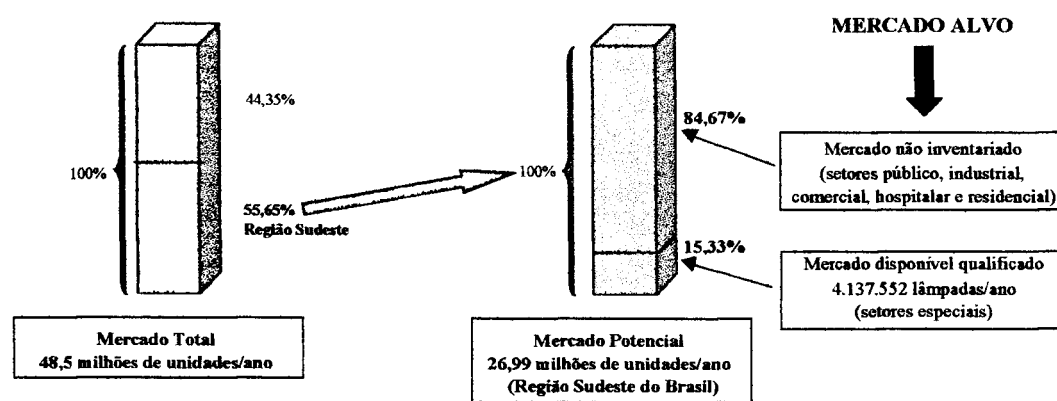


Figura 5.3 – Dimensão do mercado total de lâmpadas a serem recicladas no Brasil e mercado potencial na região sudeste.

5.6 - ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

A estrutura organizacional dimensionada para uma usina estruturada conforme o Cenário 1 pode ser composta de três áreas principais: produção, serviços/marketing e administração (Figura 5.4).

5.6.1 - Quadro de pessoal e estimativa de salários

O quadro de pessoal técnico-administrativo necessário para o funcionamento da usina idealizada é composto de 10 pessoas, conforme Tabela 5.7. Na Tabela 5.8 encontra-se apresentada uma estimativa de salários para o quadro de pessoal da usina. O total mensal, incluindo encargos sociais e trabalhistas (75%), é de R\$ 14.805,00. Não foi incluído nesta tabela o salário do diretor/presidente da empresa.

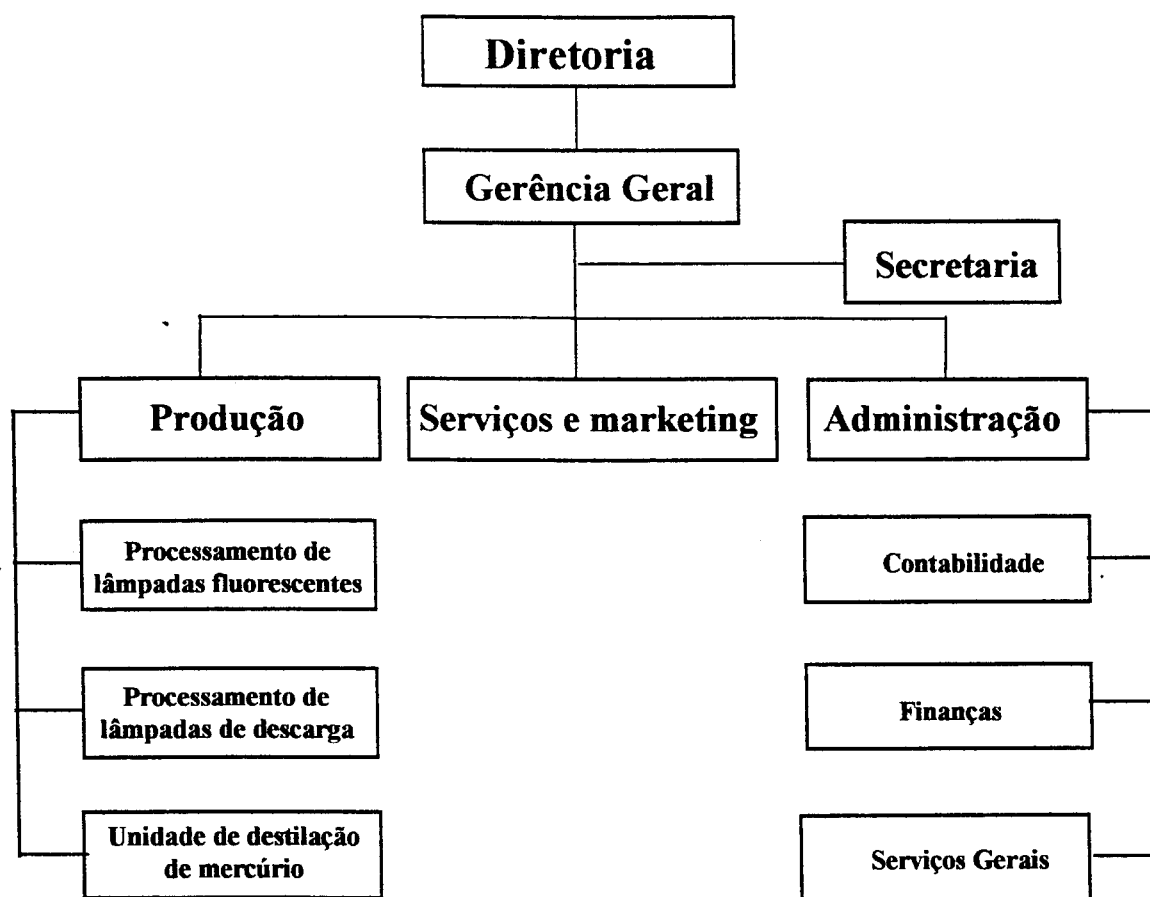


Figura 5.4 – Estrutura organizacional para uma usina de reciclagem de lâmpadas.

Tabela 5.7 – Pessoal técnico-administrativo necessário a uma usina de reciclagem de lâmpadas.

Especificação	Número de trabalhadores	Nível de escolaridade
Gerente Geral	1	Superior
Operador para os processadores	1	Médio (completo)
Operador para a unidade de destilação	1	Médio (completo)
Secretária	1	Médio (completo)
Pessoal do setor de vendas e marketing	1	Médio (completo)
Pessoal do setor contábil/financeiro	1	Médio (completo)
Motorista	2	1º Grau (completo)
Serviços gerais (serventes)	2	1º Grau (incompleto)
Total	10	

Tabela 5.8 - Estimativa de salários.

Número	Descrição	Salário mensal (R\$)	Salário mensal + encargos
01	Gerente Geral	2.700,00	4.725,00
02	Operadores de Equipamentos	720,00	2.520,00
01	Secretária	540,00	945,00
02	Técnicos (vendas de serviços, marketing e financeiro/contábil)	900,00	3.150,00
02	Motorista	720,00	2.520,00
02	Serventes	270,00	945,00
Total mensal			14.805,00

5.7 – CRONOGRAMA PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE RECICLAGEM DE LÂMPADAS

A implantação de uma usina de reciclagem de lâmpadas depende de uma série de tarefas. Dentre elas, foram identificadas 13 principais:

1. elaboração de Relatório de Viabilidade;
2. licenças Ambientais (Relatórios de controle ambiental – RCA, de impacto ambiental - EIA/Rima e Licenças de Funcionamento);
3. negociação com interessados no empreendimento;
4. aquisição de terreno;
5. negociação para a compra de equipamentos importados;
6. visita técnica ao(s) fornecedor(es) de equipamentos importados;
7. serviços de obras civis – terraplenagem e construção de galpão industrial;
8. especificação, compra de equipamentos nacionais e montagens;
9. recebimento de equipamentos e desembaraços aduaneiros;
10. montagem de equipamentos importados;
11. licença de operação
12. seleção, contratação e treinamento de pessoal e
13. início de operação da usina de reciclagem.

Em estudos realizados com a ajuda do aplicativo Microsoft Project (Figura 5.5), as tarefas foram arranjadas numa seqüência lógica e com previsão de tempo determinado (o aplicativo considera somente dias úteis trabalhados e jornadas de 8 horas de trabalho/dia).

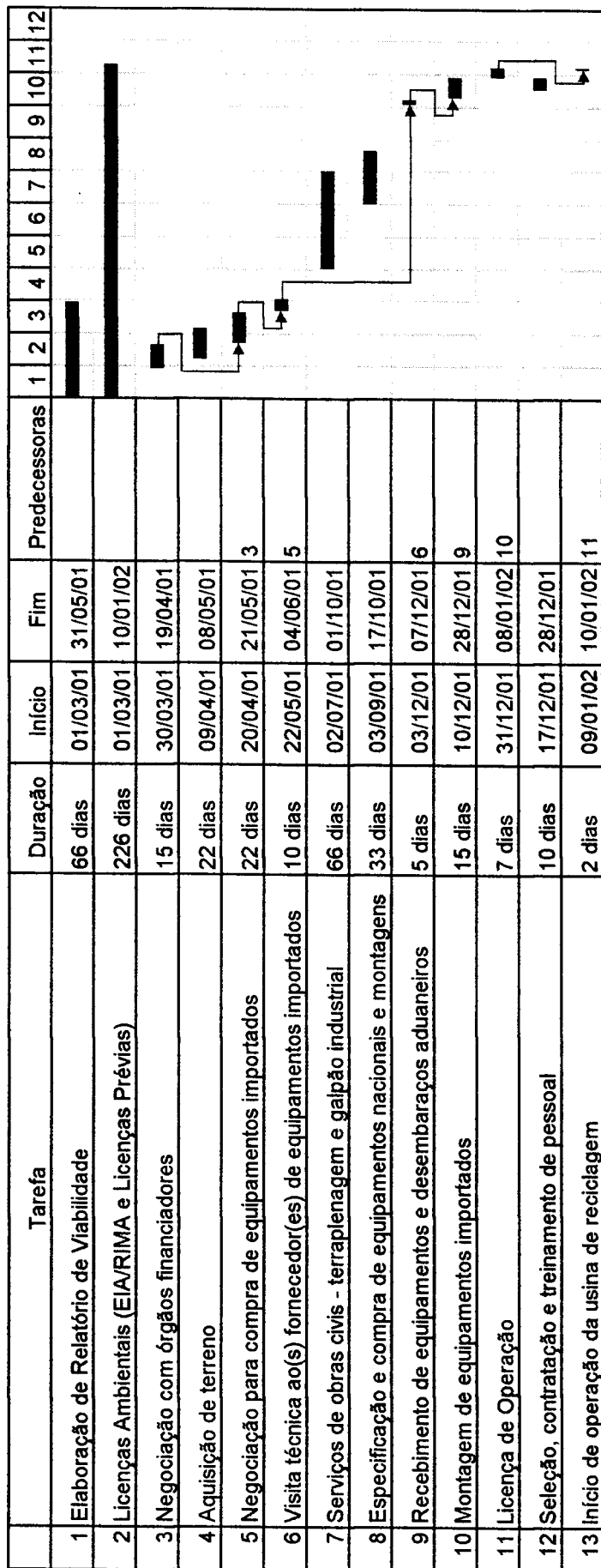


Figura 5.5 - Cronograma de implantação para uma usina de reciclagem de lâmpadas.

As tarefas 5, 6, 9, 10, 12 e 13 possuem tarefas predecessoras, ou seja, o início delas depende do término das tarefas 3, 5, 6, 9, 10 e 11, respectivamente.

O cronograma idealizado prevê que o início de entrada em operação da usina de reciclagem (Tarefa 13) dar-se-ia 226 dias úteis após o início da Tarefa 1. Evidentemente, tal cronograma poderá ser compactado ou modificado de acordo com os interesses do investidor.

5.8 - ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

5.8.1 - Definições e condições de contorno

As definições conceituais apresentadas neste capítulo foram extraídas do Manual de Preparação de Estudos de Viabilidade Industrial (Organização para o Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas 1987)

Considerando os equipamentos selecionados e as informações prestadas pelo fabricante (MRT 1998), os fatores de maior relevância para a avaliação econômico-financeira preliminar foram os seguintes:

- ❖ Capacidade normal dos processadores: a capacidade normal permitida, tanto para o processador de lâmpadas fluorescentes como para o processador de lâmpadas de descarga é da ordem de 4.224.000 lâmpadas/ano, considerando-se 8 horas de trabalho/dia e 22 dias úteis/mês.
- ❖ Capacidade normal da unidade de destilação: 100 L/batelada.dia, o que corresponde a 51.666 lâmpadas/dia, considerando-se a densidade do pó de fósforo como sendo de 3,10 g.cm⁻³ e que cada lâmpada contenha 6 g desse pó.
- ❖ Mão-de-obra: refere-se à despesa com salários de pessoal, 13º salário e abono de férias.
- ❖ Despesas: referem-se às despesas com telefone, água, materiais de escritório e outras.
- ❖ Custos com propagandas, marketing de vendas de serviços e salário de diretor/presidente não foram incluídos.
- ❖ Quantitativo de lâmpadas recicladas (5 cenários analisados):
 - cenário 1: 1.320.000 lâmpadas/ano;

- cenário 2: 3.960.000 lâmpadas/ano;
- cenários 3: 3.960.000 lâmpadas/ano, com crescimento anual projetado de 10%;
- cenário 4: 3.960.000 lâmpadas/ano, com crescimento anual projetado de 20%;
- cenário 5: 3.960.000 lâmpadas/ano, com crescimento anual projetado de 25%;
- para esses cenários foram postulados incrementos de 6% ao ano para custos variáveis (mão de obra, energia elétrica, manutenção e outros) e para despesas (telefone, água, material de escritório e outras).
- ❖ Valor cobrado pelos serviços de reciclagem: R\$ 0,50/unidade de lâmpada, o que corresponde a USD\$ 0,23/unidade de lâmpada.
- ❖ Período de projeção: 10 anos.
- ❖ Custo do capital: 15 % ao ano.
- ❖ Depreciação: a taxa de depreciação de 10% ao ano foi fixada de acordo com o Regulamento do Imposto de Renda de 1994, artigos 248 e 264, da Secretaria da Receita Federal.
- ❖ Não foram incluídos as contribuições e impostos incidentes sobre a prestação de serviços: Cofins, CPMF, PIS, ISSQN etc.
- ❖ Não foi incluída a Necessidade de Capital de Giro (NCG) para fazer frente à operacionalização da empresa no primeiro ano e custos de logística (deslocamento até as empresas para processar as lâmpadas e transporte do pó de fósforo para a usina de destilação).
- ❖ *Payback*: é o prazo requerido para recuperar os gastos com o investimento original, por meio dos lucros gerados pelo empreendimento. Representa, portanto, o prazo de recuperação do capital investido.
- ❖ Lucro: é definido como o lucro líquido, após os impostos, descontando-se os custos financeiros e a depreciação.

- ❖ Valor Presente Líquido (VPL): é o valor obtido descontando-se, separadamente para cada ano, a diferença de todas as saídas e entradas de caixa acumuladas durante a duração do projeto a uma taxa de juro fixa e pré-determinada;
- ❖ Taxa Interna de Retorno (TIR): é a taxa de desconto pela qual o valor presente das saídas de caixa é igual ao valor presente das entradas de caixa. De outra maneira, é a taxa pela qual o valor presente das entradas do projeto é igual ao valor presente do investimento.
- ❖ As planilhas foram montadas com valores dolarizados (convertibilidade de moedas em 06/abril/2001: USD\$ 1.00 = R\$ 2,15).

5.8.2 - Avaliação dos cenários idealizados

A partir da combinação dos dados apresentados, vários cenários podem ser montados e estudados. Estão sendo apresentadas no ANEXO III as memórias de cálculo referentes à avaliação econômico-financeira para cada um dos 5 cenários acima definidos.

Para os Cenários 2, 3, 4 e 5 foram feitas, ainda, as seguintes considerações:

- acréscimo de 50% com despesas e custos variáveis;
- inclusão de mais um Processador C/S;
- acréscimo de 50% com equipamentos nacionais.

Na Tabela 5.9 é mostrada uma síntese numérica a respeito da avaliação econômico-financeira para os cenários idealizados/postulados.

O Cenário 1 é deficitário, pois apresenta um VPL negativo de USD\$ 537,843. Significa dizer que a receita com o quantitativo reciclado, ao longo do período projetado de 10 anos, é insuficiente para cobrir os custos do investimento original. Este cenário mostra, também, que a atividade de reciclagem não pode ficar restrita ao quantitativo levantado para a região metropolitana de Belo Horizonte. O sucesso do empreendimento depende, no mínimo, da aglutinação de outras regiões igualmente importantes. A análise de sensibilidade mostrou também que o VPL só se torna positivo quando o quantitativo de lâmpadas reciclado atinge 2.036.832 lâmpadas/ano. Este número seria o ponto de equilíbrio (*break even point*), a partir do qual a atividade começa a ter uma rentabilidade positiva.

Já os Cenários 2, 3, 4 e 5 são superavitários. O Cenário 5, com crescimento projetado de 25% ao ano apresenta, como era de se esperar, o melhor VPL – USD\$ 5,410,224 e o custo

do investimento original poderá ser recuperado após decorridos 3,49 anos, o que não é um *payback* dilatado em termos de negócio. A TIR de 50,26% é elevada, pois supre o custo do capital (15%) e remunera, adicionalmente o investimento final em 35,26%.

Os cenários aqui idealizadas com crescimentos anuais projetados demandam aprofundamento na avaliação do mercado e de ações arrojadas a fim de que os objetivos e metas preestabelecidos sejam alcançados.

Por fim, adverte-se que o empreendimento terá maior chance de sucesso se for direcionado ao mercado da Região Sudeste do Brasil, com unidade de processamento posicionada na região metropolitana de São Paulo. Seria importante negociar pré-contratos com empresas de energia elétrica de São Paulo, Rio de Janeiro e do Nordeste do Brasil que já foram privatizadas. Para alavancar a atividade, seria interessante uma avaliação sobre a possibilidade de reciclagem de outros produtos mercuriais, inclusive baterias de celulares, pois a capacidade da unidade de destilação é bem superior à dos processadores.

Tabela 5.9 – Síntese geral (Avaliação econômica-financeira).

Cenário	Quantitativo anual	Crescimento anual projetado	Investimento total	VPL	TIR	Payback
		%	USD\$	USD\$	%	Ano
1	1.320.000	0	1,200,000	(537,843)	0,83	Não tem
2	3.960.000	0	1,807,302	672,820	24,55	5,45
3	3.960.000	10	1,807,302	1,950,732	35,28	4,25
4	3.960.000	20	1,807,302	3,987,325	45,39	3,66
5	3.960.000	25	1,807,302	5,410,224	50,26	3,46

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com o intuito de estudar a problemática brasileira que envolve a contaminação ambiental provocada pelo descarte incontrolado e inadequado de lâmpadas de mercúrio, foi realizada, inicialmente, uma pesquisa quantitativa junto aos principais setores geradores desses tipos de resíduos no Estado de Minas Gerais. Naquela ocasião foi possível levantar as práticas gerenciais adotadas e obter parâmetros importantes, que serviram de base para estimativas em outras regiões do território nacional e segmentos da nossa economia.

A fim de caracterizar e classificar os resíduos de lâmpadas de mercúrio de acordo com as normas brasileiras vigentes, foram realizadas análises químicas de Cd, Hg e Pb em testes específicos de lixiviação e solubilização de resíduos.

Para melhor entendimento dos processos utilizados na de-mercurização dos resíduos de lâmpadas de mercúrio, foi feito um levantamento de patentes, que possibilitou estabelecer a conexão entre pesquisa bibliográfica e pesquisa de patentes. Esse levantamento e contatos com fabricantes de equipamentos permitiram, de um lado, delinear o panorama mundial sobre a reciclagem de lâmpadas, e, de outro lado, o corte entre as pesquisas científicas nessa área e aquilo que tem realmente potencial para ser utilizado como tecnologia comercial.

Estudos de termodessorção de mercúrio foram realizados focalizando a matriz de pó de fósforo, material onde se concentra a quase totalidade do mercúrio contido em uma lâmpada fluorescente usada/queimada, a fim de identificar as espécies de mercúrio presentes e as condições ideais de recuperação desse metal.

Para se ter uma visão econômica da atividade de reciclagem, incluiu-se no corpo desta tese uma avaliação econômico-financeira visando à implantação de uma usina de reciclagem de lâmpadas, baseando-se no processo térmico, o qual representa a tendência mundial para a de-mercurização de lâmpadas de mercúrio.

Diante dos resultados obtidos, as conclusões são as seguintes:

■ QUANTO AO DESCARTE E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

- o estudo prospectivo sobre o descarte de lâmpadas no Estado de Minas Gerais, além do aspecto estritamente quantitativo, possibilitou levantar importantes dados qualitativos sobre o gerenciamento dos resíduos gerados. A baixa taxa de retorno verificada na pesquisa, traduzida pelo elevado número de não-respostas, evidencia, antes de tudo, o desinteresse e receio demonstrados pelos órgãos públicos/empresas pesquisados quanto a fornecerem informações que pudessem vir a comprometê-los do ponto de vista ambiental;
- ficou configurado que o descarte de lâmpadas de mercúrio se faz, basicamente, de três maneiras: (a) diretamente no lixo, (b) por reciclagem e (c) por outra modalidade. O descarte que mais chama a atenção é o constituído pelas modalidades (a) e (c), pois evidenciam a agressão ao meio ambiente. Na modalidade (c) existe um certo manejo das lâmpadas, mas o descarte culmina agredindo o meio ambiente e expondo riscos à saúde humana. A surpresa revelada pela pesquisa foi a elevada taxa de reciclagem (modalidade reconhecida como a mais correta do ponto de vista ambiental) nos setores público e industrial. Entretanto, essa taxa é aparente, pois é influenciada pelo descarte praticado por três geradores (*outliers*). Na realidade, no âmbito nacional, a taxa de reciclagem é extremamente baixa (apenas 3%). Isso mostra, de uma maneira geral, que a prática corrente de gerenciamento desse tipo de resíduo está errada, o que acentua os riscos de contaminação ao meio ambiente e à saúde pública;
- por outro lado, percebe-se que a consciência ambientalista já começa a se fazer presente, principalmente entre empresas dos setores industrial e público. Ficou constatada que a reciclagem é uma prática adotada por empresas que possuem um sistema de gestão ambiental já implantado e por empresas interessadas na certificação das Normas ISO 14.000, na maioria dos casos empresas exportadoras e aquelas que estão em vias de serem privatizadas. A implantação de sistemas de gestão ambiental nas empresas tem contribuído para o aumento da consciência ambiental e exige que as empresas tenham um sistema controlado de descarte de seus resíduos;

- de acordo com a pesquisa, o setor público é o maior gerador de descarte de lâmpadas de vapor de mercúrio/vapor de sódio, enquanto o setor industrial, o maior em lâmpadas fluorescentes;
- nos setores comercial e hospitalar a situação é muito crítica, pois 100% das lâmpadas descartadas vão diretamente para o meio ambiente. Isso demonstra, de um lado, uma total desinformação e, de outro lado, uma falta de organização nesses setores. Situação semelhante é a existente no setor residencial, que sabidamente descarta 100% de suas lâmpadas no lixo;
- existe uma concentração substancial de descarte na região polarizada de Belo Horizonte. Essa concentração desigual é, certamente, função do desequilíbrio interno de renda que existe no Estado. A situação em outros estados brasileiros é bastante semelhante à que ocorre em Minas Gerais;
- o tratamento estatístico dos dados mostrou uma enorme variabilidade, forte assimetria das curvas representativas de descarte em cada setor analisado e concentração de dados próximos à origem. A forte heterogeneidade dos descartes foi inferida em decorrência dos elevados valores de desvio padrão e dos coeficientes de variação. A mediana, por não sofrer a influência dos valores extremos (*outliers*), foi a medida de posição que melhor caracterizou o descarte de lâmpadas de mercúrio;
- o estudo possibilitou apresentar projeções de descarte mensal para empresas ou órgãos públicos situados em outros estados brasileiros, tendo como parâmetros o descarte mediano calculado para o Estado de Minas Gerais e o Índice Potencial de Consumo (IPC) do estado correspondente. Os descartes/mês por empresas/órgãos públicos localizados em estados da Região Sul e Sudeste ficaram assim estimados: 104 lâmpadas (São Paulo), 36 (Rio de Janeiro), 26 (Minas Gerais), 22 (Rio Grande do Sul) e 17 (Paraná);
- no transcurso da pesquisa, foi levantada a informação junto à Abilux a respeito do quantitativo de lâmpadas de mercúrio produzido anualmente pela indústria nacional e do consumo de mercúrio necessário à produção dessas lâmpadas. A partir desse quantitativo, foi estimado que o descarte no Brasil, em 1998, foi da ordem de 48,5 milhões de unidades/ano (relação produção/descarte = 1), sem contar com os produtos similares importados. A quantidade de mercúrio informada de 1.000 kg (média de 20,6 mg por

lâmpada) pode ser questionada, pois os resultados analíticos aqui obtidos apontam para uma carga bem maior. Em que pese os esforços realizados pela indústria de lâmpadas em todo o mundo para reduzir o conteúdo de mercúrio nesses tipos de produtos, os dados estatísticos recém apresentados pela Abilux geram, também, sérios questionamentos, pois a redução no conteúdo médio/lâmpada de 20,6 mg (1998) para 13,7 mg (2000), representou, em apenas dois anos, uma queda de 33,5% e isso não encontra registro, nem precedente na literatura mundial. Assim, todas essas questões envolvendo produção, conteúdo de mercúrio e passivo ambiental existente em nosso país reforçam mais ainda a idéia de se ter um monitoramento e controle sobre os níveis de concentração de Hg, Pb e Cd em lâmpadas nacionais e importadas;

- em termos de descarte no âmbito nacional, a Região Sudeste é a que sofre maior impacto ambiental, pois concentra 60% da economia do nosso país e consome 60% de toda energia elétrica produzida. Conseqüentemente, descarta lâmpadas nessa mesma ordem de grandeza. Nessa região, três setores sobressaem-se de imediato, em termos de potencial de descarte: (1) distribuidoras e concessionárias de energia elétrica, por causa das lâmpadas de iluminação pública, (2) montadoras de automóveis, em virtude do elevado consumo por área construída e (3) fabricantes de lâmpadas, em decorrência de perdas durante o processo produtivo;

- tendo-se em vista: (1) precariedade e escassez de informações disponíveis sobre o assunto no Brasil, (2) resistência apresentada pelos fabricantes de lâmpadas e pelas empresas pesquisadas em fornecerem informações, e (3) incertezas sobre a fidelidade de tais informações, ficou claro na pesquisa a necessidade de se ter normas específicas para o gerenciamento desses tipos de resíduos, sobretudo no que concerne ao seu manuseio, transporte e disposição final. Percebe-se que as empresas privadas e órgãos públicos desconhecem, de modo geral, os efeitos adversos causados pelo mercúrio, e em decorrência da ausência de uma legislação específica, tais empresas/órgãos não sabem como gerenciar seus resíduos perigosos, nem como quantificá-los;

- os resultados mostrados nessa tese apontam para a importância e necessidade de se realizarem pesquisas a respeito do comportamento do mercúrio liberado a partir de produtos manufaturados ao fim da sua vida útil, principalmente seus reflexos em

ecossistemas tropical e semitropical, como o nosso. Este estudo e as informações apresentadas aqui certamente podem contribuir para o estabelecimento dos limites de concentração de metais pesados e de práticas consistentes com a sustentabilidade social, ambiental e econômica.

■ QUANTO AOS RESÍDUOS GERADOS POR LÂMPADAS DE MERCÚRIO

- a respeito da caracterização dos principais constituintes de lâmpadas de mercúrio, existe uma nítida diferença nos pós de fósforo utilizados em lâmpadas fluorescentes e em lâmpadas a vapor de mercúrio. O primeiro, basicamente um fosfato de cálcio, mais precisamente uma fluorapatita, com Mn, Cd, Sb. Esse pó contém mercúrio - material potencialmente perigoso nesse tipo de lâmpada. O segundo, um fosfato de ítrio (xenotima) e vanadato de ítrio (wakefieldita), com concentrações importantes de Y e Eu (*red phosphors*), demais elementos do subgrupo do ítrio (Sm-Ho), V e Pb. Em lâmpadas a vapor de sódio e multivapores metálicos, o pó de fósforo é um tetrahidrogênio dipirofosfato dihidratado de diamônio e zinco. A composição química do pó de fósforo depende muito do tipo de lâmpada e do fabricante e constitui um dos segredos de fabricação de lâmpadas. Geralmente, o pó de fósforo é uma mistura de vários ingredientes utilizados para se conseguir um bom índice de reprodução de cores.

- dentre todos os constituintes caracterizados nos resíduos de lâmpadas de mercúrio, três merecem a atenção:

□ o vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio (aproximadamente 70% da massa total) contém chumbo em concentrações significativas, na maioria dos casos, excedendo o limite regulatório estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 10.004, Anexo G, Listagem nº 7. Esse tipo de vidro deve ser classificado como resíduo perigoso - Classe I, caracterizado como tóxico TL em Teste de Lixiviação e código de identificação D008;

□ o pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes (aproximadamente, 2% da massa total) contém mercúrio e cádmio e representa o material potencialmente perigoso em uma lâmpada fluorescente:

- 1) os testes de lixiviação para o mercúrio, levando-se em consideração toda a massa da lâmpada e, conseqüentemente a diluição do material potencialmente perigoso (procedimento requerido e estabelecido pela Norma ABNT NBR 10.005), geraram incertezas devido à complexidade da natureza física do resíduo, erros associados à preparação de amostras e dificuldades encontradas no procedimento de filtragem da lixívia. Os testes foram considerados insuficientes para a classificação desses tipos de resíduos, em conformidade com o Anexo G, Listagem nº 7, Norma ABNT NBR 10.004. Existe, também, uma certa expectativa para o enquadramento de tais resíduos utilizando-se o limite regulatório brasileiro para o mercúrio, pois tal limite ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$) é muito mais conservador do que, por exemplo, o adotado nos EUA ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$), e naquele país, os resíduos de lâmpadas fluorescentes foram classificados como perigosos. Face às dificuldades apontadas, o material potencialmente perigoso foi analisado em separado (massa bruta do pó de fósforo) e, em seguida, os resultados foram ajustados à massa total da lâmpada e comparados com o limite listado no Anexo I, Listagem nº 9, Norma ABNT NBR 10.004 (100 mg de Hg /kg de resíduo). Dessa forma, ficou evidenciado que 54% das lâmpadas usadas/queimadas analisadas possuem concentrações de mercúrio que excedem o limite regulatório brasileiro. As concentrações de mercúrio no pó de fósforo são extremamente variáveis de lâmpada para lâmpada, sendo, geralmente, mais elevadas em lâmpadas usadas/queimadas do que em lâmpadas novas. Além das elevadas concentrações de mercúrio neste tipo de resíduo, devem ser considerados como fatores agravantes: (a) o potencial que o mercúrio possui de migrar do resíduo para o meio ambiente, sob condições impróprias de manuseio, (b) capacidade de bioacumulação/biomagnificação em ecossistemas, (c) persistência química e (d) toxicidade. Assim, os resíduos de lâmpadas fluorescentes, com concentrações de mercúrio acima do limite regulatório e com nítidas características de periculosidade, devem ser classificados, conforme norma brasileira de resíduos sólidos, como resíduos perigosos – Classe I;
- 2) os testes preliminares de lixiviação e solubilização para o cádmio mostraram que as concentrações desse metal nos resíduos de lâmpadas fluorescentes estão abaixo dos

limites regulatórios previstos na Norma ABNT NBR 10.0004. Conseqüentemente, se as concentrações de cádmio se mantiverem nesses patamares e levando-se em consideração apenas esse metal, tais resíduos devem ser classificados como resíduos inertes – Classe III.

□ o *pellet* de vidro sílica, em lâmpada a vapor de mercúrio, contém mercúrio elementar, sob a forma líquida. Esse *pellet* (30 g em média, corresponde, aproximadamente a 12% da massa total de uma lâmpada) é extremamente duro e difícil de ser amostrado sem que haja perda de material. Por essa razão, os resíduos gerados por esses tipos de lâmpadas, no que diz respeito ao mercúrio, não foram objeto de estudo neste trabalho. Não obstante, se levarmos em consideração, por exemplo, os conteúdos médios de mercúrio de 60 mg (lâmpada de 400 W, fabricada pela Philips) e 75 mg (lâmpada de 400 W, fabricada pela Sylvania), conforme dados apresentados no *Mercury study report to Congress, volume II: An inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States* (Usepa 1997b), e a massa média por lâmpada, da ordem de 250 g, as concentrações de mercúrio na massa bruta do resíduo correspondem a 240 e 300 mg.kg⁻¹, respectivamente. No Brasil, tais resíduos são classificados, pela Norma ABNT NBR 10.004 – Anexo I, Listagem nº 9, como resíduos perigosos - Classe I, pois apresentam concentrações acima do limite regulatório (100 mg de Hg/kg de resíduo). Como para esses tipos de lâmpadas não existem registros, mesmo nos EUA, de que as concentrações de mercúrio tenham sofrido sensíveis reduções nos últimos anos, a situação brasileira pode ser até mais delicada, em conseqüência da inexistência de fiscalização junto aos fabricantes de lâmpadas.

- a pesquisa comprovou a periculosidade dos resíduos gerados pelas lâmpadas de mercúrio, ao fim de sua vida útil. Conseqüentemente, esses resíduos devem ser manuseados e destinados adequadamente. Isso é de vital importância na medida em que se considera o ciclo de vida desses produtos, pois é na fase de destinação final (descarte) que se verifica a maior contribuição de impacto ao meio ambiente.

- portanto, é imprescindível uma legislação específica sobre o assunto, a exemplo do que ocorre com pilhas e baterias, que discipline:

- a) os limites de mercúrio, chumbo e cádmio em lâmpadas, para que os resíduos gerados estejam em conformidade com a norma brasileira de resíduos sólidos, sem que haja comprometimentos nos preços, qualidade e vida útil das lâmpadas, e
- b) gerenciamento ambientalmente adequado no que diz respeito ao manuseio, estocagem, transporte e tratamento ou disposição final, objetivando evitar efeitos deletérios à saúde humana e garantir o equilíbrio de ecossistemas.

■ QUANTO AOS PROCESSOS PARA DE-MERCURIZAÇÃO DE LÂMPADAS

- o levantamento do estado da arte sobre os processos e tecnologias utilizados na reciclagem de lâmpadas de mercúrio foi direcionado visando à conexão entre a pesquisa bibliográfica, pesquisa de patentes e contatos com fabricantes de equipamentos. Essa conexão permitiu, de um lado, delinear o panorama mundial sobre a reciclagem de lâmpadas e, de outro lado, o corte entre as pesquisas realizadas nessa área e aquilo que tem potencial para utilização comercial. Esse levantamento foi realizado a fim de atender à expectativa de determinadas empresas (estudo prospectivo) frente ao problema ambiental gerado pelo descarte desses tipos de lâmpadas;
- a pesquisa de patentes confirmou a tendência mundial à recuperação do mercúrio contido nos resíduos de lâmpadas através do processo térmico, que predomina amplamente sobre o processo químico. As patentes mais recentes já não fazem mais menção a este último processo, e isto ficou bem evidente nos contatos estabelecidos com fabricantes de equipamentos e recicladoras de resíduos de lâmpadas;
- os EUA detêm o maior número de patentes para tratamento de resíduos de lâmpadas. Grande parte das patentes depositadas naquele país se deve, principalmente, à própria necessidade norte-americana de gerenciar o seu enorme descarte produzido anualmente. Outro fator de importância na produção de patentes foi o incentivo patrocinado pelo *Green Lights Program*, que propiciou o florescimento da indústria de reciclagem de lâmpadas, a partir da década de 90. A implementação da nova Usepa Final Rule – Universal Waste Rule (40 CFR Parts 260, 261, 264 etc.), certamente trará incremento adicional à atividade de reciclagem de lâmpadas;

- a nova tendência tecnológica e mercadológica mundial está voltada para equipamentos que identificam o tipo de pó de fósforo utilizado em cada lâmpada fluorescente e que recuperem subprodutos praticamente isentos de mercúrio.

■ QUANTO À ATIVIDADE DE RECICLAGEM

- ficou constatado que a reciclagem é uma atividade em franca ascensão em diversas partes do mundo, pois além de descontaminar o meio ambiente pelo uso de uma tecnologia ambientalmente correta e segura, é também fator estratégico para a racionalização de uso do recurso natural; além disso proporciona a oportunidade de reutilização de subprodutos. A maioria dos países da Europa possui uma taxa de reciclagem superior a 50%, podendo alcançar 87,5%, como, por exemplo, na Suíça. Nesses países, a elevada taxa de reciclagem e, conseqüentemente, um manejo mais adequado desses tipos de resíduos, são reflexos da consciência ambiental e eficiência/eficácia na aplicação das leis ambientais existentes. No Brasil, ao contrário, a baixa taxa é reflexo, primeiro, da falta de conscientização ambiental e, segundo, da falta de leis específicas;

- em diversos países, o descarte de lâmpadas usadas/queimadas é feito por intermédio da distribuição reversa, situação em que o usuário devolve a lâmpada usada ao local onde ela foi comprada, o vendedor a devolve ao distribuidor e assim por diante, até chegar ao fabricante (início da cadeia de distribuição do produto). A idéia da distribuição reversa tem funcionado muito bem em país com consciência ambiental já consolidada, distâncias de transporte relativamente reduzidas e simplicidade no seu sistema de distribuição. No Brasil, o ônus pela reciclagem tem sido suportado pelos geradores de resíduos, numa tendência semelhante à situação que vigora nos EUA. Essa tendência certamente decorre, em parte, da complexidade do sistema de distribuição existente em nosso país;

- nos países desenvolvidos, onde a reciclagem é uma atividade em prática há mais de uma década, os preços cobrados pela prestação de serviços são diferenciados por tipo de lâmpada. No Brasil, ao contrário, praticamente não existe uma diferenciação, apesar de, por exemplo, uma lâmpada de multivapores metálicos custar 15 vezes mais que uma lâmpada fluorescente. Daí se conclui que essa falta de diferenciação é devida mais à

pressão do gerador do resíduo, já que a atividade é voluntária, do que à consideração do valor agregado da lâmpada em si;

- os subprodutos obtidos no processo de reciclagem possuem baixo valor agregado e a atividade somente será auto-sustentável se for alavancada pela prestação de serviços de de-mercurização de outros tipos de resíduos;

■ QUANTO À ESPECIAÇÃO DO MERCÚRIO CONTIDO NOS RESÍDUOS

- os resultados analíticos exibidos neste trabalho mostraram que a matriz de pó de fósforo é o material perigoso e poluente dos resíduos de lâmpadas fluorescentes usadas/queimadas. As concentrações de mercúrio nesse tipo de matriz são bem mais elevadas do que as concentrações no mesmo tipo de matriz em lâmpadas novas, chegando em alguns casos a 40 vezes. Considerando que não deva existir variação no conteúdo de mercúrio de uma lâmpada nova para o de uma lâmpada usada/queimada do mesmo tipo e modelo, a diferença apontada é que o mercúrio em lâmpadas usadas/queimadas está essencialmente adsorvido na matriz de fósforo, em menor extensão no vidro e, possivelmente, nos demais componentes internos (poeira emissiva, filamentos, eletrodos); em lâmpadas novas a matriz de pó de fósforo não é o lugar preferencial para o mercúrio, nem o vidro mostra interação com esse metal;

- a interação do mercúrio com a matriz de fósforo é evidenciada no estudo de TDAAS, que revelou a presença tanto de Hg^0 , a espécie inicialmente adicionada, como de espécies Hg^{1+} e Hg^{2+} . As espécies mais comumente encontradas e em maior quantidade foram Hg^0 e Hg^{1+} , porém houve dois casos onde o predomínio de Hg^{2+} foi absoluto. Diferentemente dos dados apresentados no relatório da Usepa (1997a), que sugere a espécie divalente como predominante nesse material, os resultados mostraram que as espécies de mercúrio nos resíduos de lâmpadas usadas/queimadas são Hg^0 , Hg^{1+} e Hg^{2+} , com predomínio de Hg^0 e Hg^{1+} sobre a espécie divalente;

- existe uma forte tendência de que as concentrações mais elevadas de mercúrio estejam associadas às condições onde prevalecem formas oxidadas de Hg^{1+} e Hg^{2+} ;

- os termogramas com amostras de vidro de lâmpadas usadas/queimadas mostraram que a temperatura de dessorção do mercúrio atinge patamares bem superiores à de qualquer padrão específico de mercúrio conhecido. Nesse tipo de matriz advogam-se: (1) interação do mercúrio metálico com componentes do vidro (ligação intermetálica, por exemplo com o Na), muito mais forte que a interação iônica constatada na matriz de fósforo e (2) difusão do mercúrio oxidado no interior da matriz vítrea. Mesmo considerando-se que os resíduos de vidro de lâmpadas fluorescentes não sejam classificados como resíduos perigosos ou semi-inertes em testes de lixiviação/solubilização, atenção especial deve ser dada a esses resultados em casos de reciclagem/reutilização deste material, pois condições de altas temperaturas, por exemplo, liberariam mercúrio em quantidades que vão ser importantes ou não, dependendo do volume de material utilizado no processo;

- as espécies Hg^{+1} e Hg^{-2} formam compostos mais solúveis que o Hg^0 e são, portanto, mais impactantes ao meio ambiente, uma vez que podem ser transportadas via aquosa com maior facilidade, oxidadas e organificadas. Em termos de tratamento dos resíduos de lâmpadas fluorescentes (lâmpadas usadas/queimadas e/ou novas), via tratamento térmico, ou qualquer outro tipo de tratamento, pode-se concluir que as condições ideais de recuperação do mercúrio contido estão longe de serem as mesmas, uma vez que as lâmpadas, além de conterem espécies diferentes, possuem também quantidades diferentes de mercúrio. Os termogramas mostraram que pode ocorrer liberação de mercúrio a temperaturas bem altas, acima de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já no caso do vidro de lâmpadas usadas/queimadas, a temperatura final de dessorção pode atingir o patamar de $800\text{-}850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essas temperaturas devem ser levadas em consideração durante o processamento térmico dos resíduos de lâmpadas.

■ QUANTO À AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE RECICLAGEM

- a avaliação econômico-financeira mostrou que a instalação de uma usina de reciclagem de lâmpadas de mercúrio no Brasil, utilizando o método térmico, torna-se viável somente a partir de um ponto de equilíbrio (*break even point*) de 2.036.832 lâmpadas/ano. Os fatores que contribuem para esse elevado ponto de equilíbrio são:

- 1) dependência muito grande da importação de equipamentos (96% do total dos equipamentos necessários);
- 2) elevadas taxas de importação (46 e 58%, dependendo do equipamento);
- 3) valorização sempre crescente do dólar em relação ao real, e
- 4) baixo valor cobrado pelos serviços de reciclagem.

- a atividade tornar-se-á lucrativa e auto-sustentável se houver

a) incremento do quantitativo a ser reciclado e alavancagem da atividade com a reciclagem de outros produtos;

b) reduções e isenções de taxas de importação e de impostos;

c) adoção de uma estratégia e logística de trabalho diferenciadas.

■ QUANTO À LEGISLAÇÃO PERTINENTE

- a legislação federal norte-americana considera os resíduos de lâmpadas de mercúrio como resíduos perigosos, pois muitas lâmpadas usadas são reprovadas nos testes de TCLP, cujo limite regulatório para o mercúrio é de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. De acordo com a regra final, em vigência a partir de 6 de janeiro de 2000, esses resíduos devem ser gerenciados com as mesmas regulamentações válidas para os resíduos universais (regulamentações aplicáveis, por exemplo, a certos tipos de produtos que contêm mercúrio, como baterias, pesticidas, termostatos etc.);

- pela legislação brasileira de resíduos sólidos em vigência - Norma ABNT NBR 10.004 - o limite regulatório para o mercúrio é de 100 mg de Hg/kg de resíduo (Anexo I - Listagem 9 - massa bruta do resíduo) ou $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, em testes de lixiviação (Norma ABNT NBR 10.005). Esse último limite corresponde, por exemplo, à metade do limite regulatório norte-americano. A legislação ambiental brasileira, além de ser uma adaptação daquela adotada em países desenvolvidos, é muito restritiva em termos de padrões de emissão de mercúrio. Na realidade, o que se verifica é que ela nem sempre é cumprida;

- existem dúvidas, por exemplo, quanto à *qualidade ambiental* dos produtos similares importados e adequação dos resíduos por eles gerados à norma brasileira de resíduos sólidos. Esse quadro pode agravar-se ainda mais se forem considerados, por exemplo, os

produtos similares importados provenientes de países asiáticos (China, Taiwan, Coreia do Sul etc.).

- a legislação brasileira para o descarte de resíduos de lâmpadas de mercúrio está segmentada e restrita a uma lei estadual (Rio Grande do Sul), a dois projetos de lei estaduais (Bahia e Minas Gerais) e a uma lei municipal (cidade de São Paulo). Somente as lâmpadas fluorescentes são objeto dessas legislações, o que deixa de fora as lâmpadas de vapor, igualmente consideradas resíduos perigosos – Classe I. Além do mais, as legislações estaduais fazem menção ao gerenciamento de resíduos de lâmpadas em conjunto com outros tipos de resíduos, tais como baterias de telefone celular e pilhas. Ora, as lâmpadas possuem características que as diferenciam dos outros produtos, principalmente em termos de concentrações de mercúrio e chumbo, fragilidade do produto em si e dificuldade de serem mantidas intactas, o que justificam necessidade de gerenciamento mais específico;

- a tendência explicitada nos projetos de lei em tramitação acompanha a legislação vigente nos principais países da Comunidade Européia, ou seja, a responsabilidade pelos resíduos é da competência dos fabricantes (fabricante poluidor – Princípio da Responsabilidade Estendida pelo Produto). Entretanto, o que vem sendo praticado aqui no Brasil é o contrário, ou seja, o gerador do resíduo (Poluidor-Pagador) é que tem arcado com o ônus da descontaminação, numa nítida tendência à adoção do sistema existente nos EUA;

- não existe legislação mais abrangente, em nível federal, para o gerenciamento desses tipos de resíduos, que contemple manuseio, coleta, estocagem, transbordo, transporte e tratamento ou disposição final.

SUGESTÕES

Ao final dos trabalhos, gostaria de apresentar como sugestões:

- a realização de pesquisas a respeito do comportamento do mercúrio liberado a partir de produtos manufaturados ao fim da sua vida útil, principalmente seus reflexos em ecossistemas tropical e semitropical, como o nosso;

- o estudo da eficiência/eficácia do uso de complexantes e/ou anti-oxidantes a serem incorporados às lâmpadas de mercúrio, justamente para evitar que o mercúrio metálico seja oxidado a formas mais solúveis;
- a busca da melhoria do controle de qualidade dos reatores utilizados em lâmpadas fluorescentes, já que a vida útil das lâmpadas de mercúrio depende fundamentalmente desses reatores;
- o estímulo à substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes, no bojo do programa de contingência para economia de energia, semelhante ao *Green Lights Program*, ocorrido nos EUA há mais de uma década. Numa segunda fase, estimular a troca de lâmpadas fluorescentes tipo T12 (pó fluorescente comum) por T10 (pó trifósforo/terras raras) e à utilização de lâmpadas fluorescentes compactas, ambas chamadas de lâmpadas eficientes. Esse estímulo poderia ser traduzido por um preço subsidiado/diferenciado ou até mesmo doação de lâmpadas à população de baixa renda;
- em momentos de crise energética que estamos vivenciando, a procura pela eficiência dos sistemas de iluminação, o que conseqüentemente se reflete numa economia de energia, deve ser acompanhada também de proteção ambiental. Assim, a substituição das lâmpadas em uso por outras mais eficientes e o estímulo a essas substituições - incluindo aqui o Programa Reluz, do Governo Federal que visa a tornar mais eficientes 9 milhões de pontos de iluminação pública - devem ser monitorados e fiscalizados pelos órgãos ambientais competentes no que concerne à fabricação e importação de lâmpadas. Cabe aqui ressaltar a necessidade de atenção para que os resíduos gerados por esses dispositivos mais eficientes estejam de acordo com a Norma Brasileira de Resíduos Sólidos, sob pena de agravar ainda mais a contaminação mercurial provocada pelo descarte não-controlado que hoje grassa em nosso país. Conciliar a economia de energia com a proteção ambiental será o novo desafio para o Desenvolvimento Sustentado, e mais, que esse desafio passe a ser uma conquista num futuro próximo;
- face à situação pretérita e a que se antevê com a crise de energia apresento, no Anexo I, proposta de legislação federal específica para os resíduos de lâmpadas de mercúrio a fim de que os efeitos deletérios à saúde humana e aos ecossistemas sejam os mínimos possíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Advanced Environmental Recycling Company (AERC). 1998. *Catalogues*. Flanders. New Jersey, USA. 9 p.
- Air Cycle Corporation. 2001. *Folheto explicativo – the bulb eater*, modelo 55 VRS. 1p.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment federation. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th Edition, Washington (DC), (Referências 3112-Hg B, 3500-Cd B e 3500-Pb B).
- Apliquim. 1992. *Método para descontaminação e reciclagem de vidro de lâmpadas fluorescentes*. Pedido de Patente BR 9.204.043 (<http://www.inpi.gov.br>).
- Apliquim. 1999. *Manejo e disposição de lâmpadas contendo mercúrio (INS). Custos de reciclagem*. São Paulo, (<http://www.apliquim.com.br>).
- Apliquim. 2001. Palestra proferida por Cyro E. Valle, Conama – Brasília em 01/08/2001.
- Assembléia Legislativa do Estado da Bahia (Alba). 1997. *Projeto de Lei 11.305/97*, (<http://www.bahia.ba.gov.br>).
- Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais (ALMG). 1999. *Projetos de Lei 4/99 e 6/99* (<http://hera.almg.gov.br/netahtml/mate.html>).
- Assembléia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul (ALRS). 1998. *Lei nº. 11.187/98*. (<http://200.248.55.188>).
- Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux). 1998. *Fax Abilux 07/10/1998*, São Paulo, de Ferreira M.M. (Produção brasileira de lâmpadas de mercúrio). 1 p.
- Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux). 2001. Palestra proferida por Alvacyr H. C. Rezende, em reunião no Conama – Brasília, em 01/08/2001.
- Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (Abradee). 1999. *Participação das companhias no mercado de distribuição de energia elétrica, Base: jan - dez 1998*. (<http://www.abradee.com.br>).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1983. *Transporte, armazenagem e manuseio de materiais. Simbologia*. Rio de Janeiro ABNT. 1983. 67 p. (NBR 7.500).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1987a. *Resíduos sólidos. Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT. 63 p. (NBR 10.004).

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1987b. *Lixiviação de resíduos*. Rio de Janeiro: ABNT, 10 p. (NBR 10.005).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1987c. *Solubilização de resíduos*. Rio de Janeiro: ABNT, 3 p. (NBR 10.006).
- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) 1998. *Anuário estatístico da indústria automobilística brasileira*. São Paulo, 185 p.
- Associação Sueca dos Pacientes de Mercúrio Odontológico. 1998. *O abc da intoxicação por mercúrio devido a obturações de amálgama odontológico* (Texto traduzido por Rocha A.B., (<http://www.odontologia.com.br>)).
- Association of Lighting and Mercury Recyclers. 2000. *Mercury lamp recycling information*. Personal Communication. e-mail from Abernathy P., 1 p.
- Astimex Scientific Limited. 1999. *Mineral Standard*. Serial No. 99-045. MINM 25-53 (<http://www.proscitech.com>).
- Aston S.R., Riley J.P. 1972. The determination of mercury in rocks and sediments, *Anal. Chim. Acta*, **59**, 349-354.
- Babbie E. 1999. *Métodos de pesquisa de survey*. Belo Horizonte: Editora UFMG, (Tradução de: Survey Research Methods, USA, Second Edition, 1997, International Thomson Publishing Inc.), 519 p.
- Bakir F., Damluji S.F., Amin-Zaki L., Doherty R.A. 1973 Methylmercury poisoning in Iraq. *Science*, **181**: 230-241.
- Battye W., Mcgeough U., Overcash C. 1994. *Evaluation of mercury emissions from fluorescent lamp crushing*. Usepa, 25 p. (EPA-453/D-94-018).
- Bethlehem Aparattus Company. 1999. *Catálogo de equipamentos*. Hellertown, (USA). 8 p.
- Biester H., Nehrke G. 1997. Quantification of mercury in soils and sediments- acid digestion versus pyrolysis, Fresenius J. Anal. Chem. **358**, 446-452.
- Biester H., Gosar M., Covelli S. 2000. Mercury speciation in sediments affected by dumped mining residues in the drainage area of the Idrija Mercury Mine. Slovenia, Environ. Sci. Technol. **34**, 3330-3336.
- Caldeira F.J., Luz A.F.O. 1996. *Análise granulométrica na faixa de subpeneiramento, utilizando cyclosizer Mod. M-4 da Warman*. Belo Horizonte, CDTN, 8 p. RT(Ct5)CDTN-0296.
- Canadian Intellectual Property Office (CIPO). 1999. (<http://patent.ic.gc.ca>).
- Center for Health, Environment and Justice. 1997. *Mercury poisoning: The legacy of Minamata, Japan*. (<http://www.essential.org/orgs/cchw/ehm/mar97.htm>).

- Centro de desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN). 1985. *Determinação de densidade de minérios (Método do picnômetro)*. Belo Horizonte. 2p.
- Cetesb. 1981. *Estudo de mercúrio nas águas e estuário do rio Botafogo*. Pernambuco. Fase 1 – Estudo Preliminar. São Paulo, Cetesb, 32 p.
- Cogar M.J. 1992. *Lamp reclamation process*. Patente US 5,106,598, (<http://www.uspto.gov>).
- Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama). 1999. *Resolução No. 257 para pilhas e baterias usadas*. 3 p. (<http://www.mma.gov.br>).
- Dang T.A., Frisk T.A., Grossman M.W., Peters C.H. 1999. Identification of mercury reaction sites in fluorescent lamps. *Journal of the Electrochemical Society*, **146** (10): 3896-3902.
- De Corte F. 1986. *The k_0 -standardization method, a move to the optimization of neutronactivation analysis*. Ryksuniversiteit Gent, Faculteit Van de Wetenschappen, 464 p.
- Department of Environment, Health and Natural Resource (DEHNR). 1997. *Supplement to the enforcement policy concerning lights containing mercury*. Document DPPEA-97-12 DEHNR. North Carolina, USA, 4 p.
- Dietrich D.K., Foust D.F., Haitko, D. A. 1998a. *Antioxidant control of leachable mercury in mercury vapor discharge lamps*. Patent EP 840352 A2, 5p [CA 128:3286610].
- Dietrich D.K., Foust D. F., Haitko D.A. 1998b. *Complexing agent control of leachable mercury in fluorescent lamps*. Patent US 5,777,434 A. 6 p. [CA 129:85424].
- Dinheiro Vivo. 1998. Agência de Informações. (<http://www.advivo.com.br/>).
- Doughty D.A., Wilson, R.H., Thaler, E.G. 1995. Mercury-glass interactions in fluorescent lamps. *J. Electrochem. Soc.*, **142** (10), 3542-3550.
- Dynamic Technologies for the Environmental Industry (Dytec). 1998. *Catalogues*. Blaine (MN). USA, 6 p.
- Eagle A. 1997. *Government gives 'Green Light' to old fluorescent tubes: A brilliant idea*. 290/ENV, UK, 5 p. (<http://www.environment.detr.gov.uk>).
- Ecoblock. 2000. *Catálogo geral*. 4 p. (<http://www.ecoblock.com.br>).
- Ecolights Northwest. 1998. *Fluorescent lamp recyclers*. 8 p. (<http://www.ecolights.com>).
- Eletricidade Moderna. 1998. Descontaminação de lâmpadas na Celesc. *Revista Eletricidade Moderna*. Editora Aranda, São Paulo. **291**: 12-13.
- European Patent Office (EPO). 1999. (<http://ep.espacenet.com>).

- Finn D.W., Ouellette M.J. 1992. Compact fluorescent lamps: What you should know. *Progressive Architecture*. 4: 89-92.
- Fluorescent Lamp Recyclers Inc. (FLR). 1998. *The FLR Recycling Process*. Canada. 12 p. (<http://www.world.com/commercial>).
- Foulke J. 1994. *Mercury in fish: Cause for concern*. FDA Consumer. 1v.
- Foust D.F., Akins W.W., Arsena V.J., Doliac D.J., Haitko D.A., Jansma J.B. 1998. Method for incorporating anti-oxidants within a fluorescent lamp's base shell. US Patent 5,821,682.
- Foust D.F., Haitko D.A., Dietrich D.K. 1999. Control of leachable mercury in fluorescent lamps by iron addition. US Patent 5,998,927.
- Fowler R.A., Bonazoli R.P. 1993. *Mercury vapor discharge lamp containing means for reduction mercury leaching*. Patent US 5,229,687 A, 8 p.
- Gazeta Mercantil. 1998. Atlas do mercado brasileiro. São Paulo: *Gazeta Mercantil*. 1: (1), (Publicação Anual). p. 106-109.
- Goleb J.A. 1971. The use of permanent mercury source for spectroscopic studies of varying amounts of mercury, *Appl. Spectrosc.* 25, 94-96.
- Haitko D.A., Foust D.F., Dietrich D.K. 1998. Antioxidant control of leachable mercury in fluorescent lamps. US Patent 5,754,002
- Henry H.G., Stever K.R., Heady H.H. 1972. Determination of mercury in low-grade ores. *Appl. Spectrosc.*, 26, 2, 288-293.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2001. *Contagem da população - 2000*. (<http://www.ibge.gov.br/estatística>).
- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama). 2001. (<http://www.ibama.gov.br>).
- Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI). 1999. (<http://www.inpi.gov.br>).
- Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS). 1998. International Center for Diffraction Data - ICDD. *Hanawalt search manual, inorganic phases, powder diffraction file, sets 1-48*, Pennsylvania, USA.
- Jpd Training Limited. 1996. *Auditoria ambiental - Curso básico do Eara*. Rio de Janeiro: Proenco, 1v. (Tradução: Proenco Brasil Ltda.).
- Justus S.L. 1998. *Mercury Poisoning: The Legacy of Minamata, Japan*. Technical Report. (http://www.members.tripod.com/~Sandra_Justus/).
- Klinedinst K.A., Shinn D.B., Fowler R.A. 2001 *Mercury vapor discharge lamp containing means for reducing leachable mercury*. US Patent 6,169,362

- Koksoy M., Bradshaw P.M.D., Tooms J.S. 1967. Notes on the determination of mercury in geological samples. *Trans. Inst. Mining Met. Sect B*, **76**, b121-b124.
- Lawrence B. 1992. High vacuum mercury retort recovery still for processing EPA D-009 hazardous waste. In: Workshop on removal, recovery, treatment and disposal. *Abstracts Proceedings*. Alexandria, Virginia (USA), p 113-116 (EPA/600/R-92/105).
- Lex. 1998. *Legislação do Município de São Paulo - Lei 12.653 98*. São Paulo, p 404-405.
- Lidums V. 1972. Determination of mercury in small quantities by direct combustion combined with cold vapor atomic absorption, *Chem. Scripta*, **2**, 159-163.
- Loja Elétrica. 1999. *FAQ's*. Belo Horizonte. 12 p. (<http://www.lojaeletrica.com.br>).
- Malm O. 1991. *Contaminação ambiental e humana por mercúrio na região garimpeira de ouro do Rio Madeira, Amazônia*. Rio de Janeiro, RJ, Tese de Doutorado, Instituto de Biofísica Carlos Chagas, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1v.
- Matos R. 1999. *Relatório da distribuição espacial e desconcentração da população em Minas Gerais, no período 1980-1991*. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, p. 4-7.
- Mega Reciclagem. 2000. *Comunicação pessoal*. (e-mail de Bittar J.) 4 p. (<http://www.megareciclagem.com.br>).
- Mercury Recovery Technology AB (MRT). 1998. *Personal Communication, Catalogues, Information, Analyses and Price Quotation*. Karlskrona, Sweden, 30 p.
- Mercury Recovery Technology AB (MRT). 1999. *Personal Communication*. (e-mail from Sundberg C.), Karlskrona, Sweden. 4 p.
- Micaroni R.C.C.M.; Bueno M.I.M.S.; Jardim W.F. 2000. Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. *Química Nova*, **23** (4), 487-495.
- Minnesota Pollution Control Agency. 1994. *Strategies for reduction mercury in Minnesota*. St. Paul, Minnesota (USA), 1 v.
- Ministério das Minas e Energia. 1998. *Balanço Energético Nacional. Ano Base 1997*. 1 v.
- Ministério do Trabalho e Emprego (MTb). 2001. *Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho*. (<http://www.mtb.gov.br>).
- Ministério dos Transportes. 1997. *Regulamentos dos transportes rodoviário de produtos perigosos. Portaria 204 97*. Brasília. (<http://www.brasil.gov.br>).
- National Electrical Manufacturers Association (Nema). 1994. *The management of spent electrical lamps containing mercury*. 2nd. Ed., New York, NY: Nema. 16 p.

- National Electrical Manufacturers Association (Nema). 1998. Mercury lamp recycling *Society Interface*. 7: (2), 28-31.
- National Electrical Manufacturers Association (Nema). 2000. *Mercury lamp recycling information*. e-mail message from Erdheim R., 1 p.
- National Recycling Coalition. 1995. *Glossary References*. 15 p. (<http://www.recycle.net>).
- Naturalis do Brasil. 2001. Informação verbal de Plínio C. D. Masi (Palestra Conama agosto/2001).
- Nazareth L.P.T., Silva L.C. 1998a. *Determinação de sílica por precipitação*. CDTN/CNEN. Belo Horizonte. RTCT5CDTN. 5 p.
- Nazareth L.P.T., Silva L.C. 1998b. *Determinação de fosfato em apatita por espectrometria de absorção molecular*. CDTN/CNEN. Belo Horizonte. RTCT5CDTN. 6 p.
- Nazareth L.P.T., Silva L.C. 1998c. *Determinação de F e Cl por potenciometria de íon-seletivo*. CDTN/CNEN. Belo Horizonte. RTCT5CDTN. 4 p.
- Nriagu O.J. 1990. Global metal pollution poisoning the biosphere. *Environment*. 32: 7-33.
- Nriagu O.J. 1999. Mercury Cycle and Global Climate Change. In: 5th International Conference – Mercury as a global pollutant. Rio de Janeiro, May 23-28. *Abstracts Proceedings*. i.
- Organização para o Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas. 1987. *Manual de Preparação de Estudos de Viabilidade Industrial*. Editora Atlas. São Paulo. 281 p.
- Osram do Brasil. 1971. *Fundamentos de Luminotécnica*. São Paulo. 54 p.
- Osram do Brasil. 1990. Iluminação Brasil. *Osram Light design*. 4: (20). São Paulo. 6 p.
- Osram do Brasil. 1996a. *Produtos para iluminação geral*. São Paulo. 14 p.
- Osram do Brasil. 1996b. *Catálogo técnico (lâmpadas de multivapores metálicos, lâmpadas fluorescentes compactas Dulux)*. São Paulo. 6 p.
- Osram do Brasil. 2000. *Comunicação Pessoal*. Departamento Garantia da Qualidade. (Comunicação pessoal com Valle F.L.), 1 p.
- Osram. 1998. *A Recycling System for Fluorescent Lamps – Disposal, processing, re-use*. Document 199 S03 E 04/98 AD, Berlim (Alemanha), Osram, 6 p.
- Osram & Sylvania. 2000. *Phosphors for fluorescent lamps*. 5 p. (<http://www.sylvania.com>).
- Philips do Brasil. 1996. *Catálogo geral Philips iluminação e folhetos técnicos de apresentação de produtos lâmpadas fluorescentes (320660810041), vapor de mercúrio (320660810081), mista (320660810061), vapor de sódio (320660810101), reatores para lâmpadas (320660810151)*. 1 v., [s. n. t.].

- Portland Press Herald. 1997. *Recharge, recycle to reduce mercury pollution*. Guy Gannett Communications. Portland – USA, 1 p.
- Raposo C., Roeser H.M. 2000. Contaminação ambiental provocada pelo descarte de lâmpadas de mercúrio. *Revista Escola de Minas de Ouro Preto (REM)*. ano 64, **53**: 1, 61-67.
- Raposo C., Roeser H.M. 2001. Contamination of the environment by the current disposal methods of mercury-containing lamps in the State of Minas Gerais, Brazil. *Waste Management Journal*, **21**: 7, 661-670 .
- Scienceweek. 1999. *Wetterhahn Laboratory Poisoning Case: Final Medical Report*. (<http://scienceweek.com/search/wymriso.htm>).
- Srivastava M., Sommerer T. 1998. Fluorescent lamp phosphors. *Journal of the Electrochemical Society*, **7** (2): 28-31.
- Sundberg C., Mangnsson H.E. 1999. *Method and system for mechanical separation of various materials substances from disposed fluorescent light tubes and similar lamps being crushed*. Patent US 5,884,854. (<http://www.uspto.gov>).
- Thaler E.G., Wilson R.H., Doughty, D.A. 1995. Measurement of mercury bound in the glass envelope during operation in fluorescent lamps. *J. Electrochem. Soc.*, **142** (6), 1968-1970.
- Trochim W.M.K. 1999. *Nonprobability sampling*. Research Methods Knowledge Base: 2nd edition, 4 p. (<http://trochim.human.cornell.edu/kb/samprnon.htm>).
- Truesdale T., Beaulieu S.M., Pierson T.K. 1993. *Management of used fluorescent lamps: preliminary risk assessment*. Final Report, Washington, U. S. EPA, 60 p.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1992. *Arsenic and Mercury: In: Workshop on removal, recovery, treatment, and disposal (EPA/600/R-92/105)*. Alexandria, Virginia (USA), p. 73-76.
- United State Environmental Protection Agency (Usepa). 1993. *National emissions inventory of mercury and mercury compounds: Interin final report*. Usepa 453/R93-048. 1 v.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1994. *Mercury usage and alternatives in the electrical and electronic industries*. Washington, DC, 56 p. (Usepa Document 5.600R94047)
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1996. *Waste reduction and proper waste management of products containing mercury*. Washington, DC, (EPA - OWR-96-30). 1 v. (<http://www.owr.ehnr.state.nc.us>).

- United States Environmental Protection Agency (Usepa) 1997a. *Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps – Final Report*. Washington, DC, Office of Solid Waste, 1 v.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa) 1997b. *Mercury study report to Congress: An inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States of America*. vol II. EPA-452/R97-004, p 3-4.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998a *Information on Hazardous Waste Lamp: Recycling Operations and Practices*. Response to Comments Document. p. 22-30. (<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/id/merc-emi/merc-pgs/vol-2/data4.pdf>).
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998b. *Notice of data availability for the study on mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps*. Comment response document. Office of Solid Waste. Washington. p. 56-57.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998c. *Industrial Non-Hazardous and Solid Waste Programs*. 1 v. (<http://www.epa.gov/osw>).
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998d. *Peer review of the EPA analytical model: mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps*. Comment response document. Comment No. 3-8
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998e. *Comments on the measurement of mercury in lamps, use of TCLP, MINTEQ*. Final rule for hazardous waste lamps. 83 p. (<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/id>).
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1998f. *Comments related to industry source reduction efforts*. Response to comments document. Final rule on hazardous waste lamps. Office of Solid Waste. 1 v.
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 1999. *Hazardous Waste Management System, Modification of the Hazardous Waste Program, Hazardous Waste Lamps. Final Rule*. Federal Register. Vol. 64. N° 128, (<http://www.epa.gov/osw>).
- United States Environmental Protection Agency (Usepa). 2000. *Background information on mercury sources and regulations*. (<http://www.epa.gov/grtlakes/>).
- U. S. Patent & Trademark Office (USPTO). 1999. (<http://www.uspto.gov>).
- Vargas Boldrinni C., Pádua H.B., Navas Pereira D., Kawakami de Resende E., Juras A.A. 1973. Contaminação por mercúrio nos rios Mogi-Guaçu e Pardo (SP). São Paulo, Sabesp, *Revista DAE*, 43 (135): 106-117.

- Vogel A.I. 1981. *Análise inorgânica quantitativa*. Editora Guanabara S. A. 300; 426-427.
- Warman International Pty. Ltd. 1965. *Cyclosizer Instruction Manual – Bulletin WCS 2*. Sydney. Austrália, 43 p.
- Werec GmbH Berlin Wertstoff. 1999. *Catalogues*. Berlin. Alemanha. 15 p.
- Windmüller C.C., Wilken R.D., Jardim W.F. 1996. Mercury speciation in contaminated soils by thermal release analysis. *Water, Air and Soil Pollution*, **90**: 399-416.
- Woodward D.R., McGuire S.D., Hellebrekers W. 1999. *TCLP compliant fluorescent lamp*. Patent US 5,898,265 (<http://www.uspto.gov>).

ANEXO I

Carta da Fiemg/CDTN utilizada no estudo prospectivo sobre o descarte de lâmpadas de mercúrio no Estado de Minas Gerais.

- Cartas semelhantes foram encaminhadas aos associados da FCEMG e AHMG.

ANEXO II

Cópia da carta do deputado Sávio Souza Cruz encaminhando Proposta de Legislação Federal ao Secretário de Meio Ambiente de Minas Gerais.

Cópias de igual teor foram encaminhadas:

- Ao Presidente da Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (Feam).
- À Câmara Federal - Deputado Federal Virgílio Guimarães.
- Ao representante da Confederação Nacional das Indústrias (CNI) no Conama - Sr. Shelley de Souza Carneiro.
- Ao Conselheiro Suplente do Conama – Sr. Roberto Brandão Cavalcanti.
- À Comissão Temática Permanente de Meio Ambiente da Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais.

ANEXO III

Memórias de cálculo (Avaliação econômico-financeira).

ANEXO IV

Proposta de Resolução ao Conama

ANEXO V

Produção científica.

ANEXO I

Belo Horizonte, 07 de outubro de 1998

Prezado Senhor,

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, órgão federal de pesquisa, localizado na Cidade Universitária - Pampulha, em Belo Horizonte, está desenvolvendo um projeto na área ambiental referente ao descarte de lâmpadas usadas/queimadas que contêm mercúrio - lâmpadas fluorescentes e de vapor de mercúrio.

A Federação das Indústrias de Minas Gerais - FIEMG, que congrega um significativo segmento da economia mineira, considera este tema relevante e, por isso, acha importante dar o seu apoio a esse Projeto que visa a proteção do ambiente em que vivemos.

Para o desenvolvimento deste Projeto consideramos de fundamental importância a execução de um levantamento de dados junto aos fabricantes de lâmpadas, grandes atacadistas, empresas do comércio em geral, instituições públicas e indústrias dos diversos setores da nossa economia para um dimensionamento do quantitativo de lâmpadas que são queimadas/descartadas mensalmente em todo o nosso Estado.

Este levantamento será o ponto de partida para:

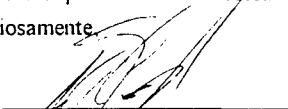
- dimensionamento da problemática da contaminação mercurial no Estado de Minas envolvendo o descarte indiscriminado de tais tipos de lâmpadas e
- estudo de alternativas técnicas viáveis visando mitigar o impacto ambiental acarretado por este tipo de descarte.

Através deste documento estamos então formalizando a nossa pesquisa (questionário anexo) no sentido de obtermos os quantitativos mensais de lâmpadas fluorescentes e de vapor de mercúrio que são descartados por esta empresa em suas diversas unidades operacionais.

As respostas a esta pesquisa poderão ser encaminhadas ao coordenador do Projeto - Dr. Cláudio Raposo através do telefax (031)499-3403 ou por e-mail: raposoc@urano.cdtm.br.

Esperando contar com o apoio de nossos colaboradores, colocamo-nos desde já à disposição para quaisquer esclarecimentos que se fizerem necessários.

Atenciosamente,



José Flávio G. M. Coelho
Gerência de Meio Ambiente do Sistema FIEMG



Cláudio Raposo
CDTN

QUESTIONÁRIO

1) Qual é o ramo de atividades de sua empresa?

2) Como é feito o descarte de lâmpadas em sua empresa?

___ No lixo Se Outro, Qual?

3) Qual é o número de lâmpadas descartadas mensalmente:

_____ Fluorescentes _____ Vapor de mercúrio

ANEXO II



ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS
GABINETE DO DEPUTADO SÁVIO SOUZA CRUZ

Ofício n º 624/GD-SSC.

Belo Horizonte, 5 de março de 2001.

Senhor Secretário,

Tenho a satisfação de passar a Vossa Excelência cópia de estudo intitulado *Legislação Ambiental sobre os Resíduos de Lâmpadas de Mercúrio – Proposta de Resolução ao CONAMA*, de autoria do Engenheiro Ambiental e Mestre em Ciências do Ambiente Cláudio Raposo, profissional pertencente ao corpo técnico do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), em Belo Horizonte.

O mencionado estudo, depois de avaliar os efeitos lesivos que a disposição não-controlada das lâmpadas de mercúrio usadas acarreta ao meio ambiente, examina a legislação nacional e internacional existente sobre o tema. CONCLUI que falta no Brasil legislação adequada e PROPÕE diretrizes para que, por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), seja elaborada Resolução de âmbito federal para cuidar, no limite do atual estágio do conhecimento, de tão específico tema.

Confiado a meus cuidados, solicito a Vossa Excelência a sua diligente colaboração para que o estudo e sua proposta sejam levados ao efetivo exame do CONAMA, enfatizando, por minha vez, tanto como parlamentar da Assembléia de Minas como quanto Engenheiro Especialista em Engenharia Ambiental, a premente necessidade de que o tratamento das lâmpadas de mercúrio usadas deixe de fazer parte do extenso elenco de itens que vêm tendo a sua importância ambiental negligenciada e venha a merecer a necessária, adequada e exaustiva regulamentação, da qual nosso país não pode prescindir.

Agradecendo-lhe o pronunciamento a respeito, sirvo-me da oportunidade para apresentar a Vossa Excelência os meus melhores e mais cordiais cumprimentos.

Atenciosamente,



Prof. Sávio Souza Cruz
Deputado Estadual

A Sua Excelência o Senhor
Doutor Paulino Cícero de Vasconcelos
Secretário de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
BELO HORIZONTE - MG

ANEXO III

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO 1) - VALORES EM USD\$

DADOS GERAIS

	Valores	Crescimento
Quantitativo de lâmpadas	1.320.000	0,00%
Preço Unitário	\$ 0,23	0,00%
Imposto de Renda	35,00%	
Custo do Capital	15,0% ao ano	
Períodos de Projeção	10 anos	

INVESTIMENTO DE CAPITAL

Equipamento	\$ 1.113.605,00
Instalação	\$ 65.116,00
Outras despesas	\$ 21.279,00
Investimento Total	\$ 1.200.000,00

DESPESAS

Aluguel	
Telefone e Agua	\$ 12.000,00
Material de Escritório	\$ 6.000,00
Outras I	\$ 2.400,00
Outras II	\$ 0,00
Total	\$ 20.400,00
Crescimento	6,00%

CALCULO DO VPL, TIR E PAYBACK

Custo do Capital	15,0%
VPL	(\$ 537.842,95)
TIR	0,83%
Payback	Não tem Payback

CUSTOS VARIÁVEIS E FIXOS

	Crescimento >	CV	CF
Mão de Obra	\$ 91.791,00	100%	0%
Materia-Prima	\$ 12.000,00	100%	0%
Energia Elétrica	\$ 6.000,00	100%	0%
Manutenção	\$ 6.000,00	0%	100%
Outros	\$ 6.000,00	0%	100%
Custos totais	\$ 115.791,00		
CV total	\$ 103.791,00		
CF total	\$ 12.000,00		

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO-ECONÔMICO-FINANCEIRA: DEMONSTRATIVO DE FLUXO DE CAIXA (CENÁRIO 1)

ESTIMATIVAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume de Vendas	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000	1 320 000
Preço Unitário	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23	\$ 0,23
Custos Variáveis	\$ 103 791,00	\$ 110 018,46	\$ 116 619,57	\$ 116 619,57	\$ 123 616,74	\$ 138 895,77	\$ 156 063,29	\$ 147 229,52	\$ 156 063,29	\$ 165 427,09	\$ 175 352,71
Custos Fixos	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00
Despesas em geral	\$ 20 400,00	\$ 21 624,00	\$ 22 921,44	\$ 22 921,44	\$ 24 296,73	\$ 27 299,80	\$ 30 674,06	\$ 28 937,79	\$ 30 674,06	\$ 32 514,50	\$ 34 465,37
Investimento Total	\$ 1 200 000,00										

DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Receitas	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00	\$ 303 600,00
Custos Variáveis	\$ 103 791,00	\$ 110 018,46	\$ 116 619,57	\$ 123 616,74	\$ 131 033,75	\$ 138 895,77	\$ 147 229,52	\$ 156 063,29	\$ 165 427,09	\$ 175 352,71
Lucro Bruto	\$ 199 809,00	\$ 193 581,54	\$ 186 980,43	\$ 179 983,26	\$ 172 566,25	\$ 164 704,23	\$ 156 370,48	\$ 147 536,71	\$ 138 172,91	\$ 128 247,29
Custos Fixos	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00	\$ 12 000,00
Despesas	\$ 20 400,00	\$ 21 624,00	\$ 22 921,44	\$ 24 296,73	\$ 25 754,53	\$ 27 299,80	\$ 28 937,79	\$ 30 674,06	\$ 32 514,50	\$ 34 465,37
Depreciação	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00
Lucro Tributável	\$ 47 409,00	\$ 39 957,54	\$ 32 058,99	\$ 23 686,53	\$ 14 811,72	\$ 5 404,43	\$ (4 667,31)	\$ (15 137,35)	\$ (26 341,59)	\$ (38 218,08)
IR	\$ 16 593,15	\$ 13 985,14	\$ 11 220,65	\$ 8 290,29	\$ 5 184,10	\$ 1 891,55	\$ (1 598,56)	\$ (5 298,07)	\$ (9 219,56)	\$ (13 376,33)
Lucro Líquido	\$ 30 815,85	\$ 25 972,40	\$ 20 838,35	\$ 15 396,25	\$ 9 627,62	\$ 3 512,88	\$ (2 968,75)	\$ (9 839,27)	\$ (17 122,03)	\$ (24 841,75)

FLUXO DE CAIXA OPERACIONAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lucro Líquido	\$ 30 815,85	\$ 25 972,40	\$ 20 838,35	\$ 15 396,25	\$ 9 627,62	\$ 3 512,88	\$ (2 968,75)	\$ (9 839,27)	\$ (17 122,03)	\$ (24 841,75)
Depreciação	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00	\$ 120 000,00
FCO (\$ 1 200 000,00)	\$ 150 815,85	\$ 145 972,40	\$ 140 838,35	\$ 135 396,25	\$ 129 627,62	\$ 123 512,88	\$ 117 031,25	\$ 110 160,73	\$ 102 877,97	\$ 95 158,25

BALANÇO PATRIMONIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ATIVO										
Caixa	\$ 150 815,85	\$ 296 788,25	\$ 437 626,60	\$ 573 022,84	\$ 702 650,46	\$ 826 163,34	\$ 943 194,59	\$ 1 063 355,32	\$ 1 156 233,28	\$ 1 251 391,53
Ativo Fixo	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00
Depreciação Acumulada	\$ (120 000,00)	\$ (240 000,00)	\$ (360 000,00)	\$ (480 000,00)	\$ (600 000,00)	\$ (720 000,00)	\$ (840 000,00)	\$ (960 000,00)	\$ (1 080 000,00)	\$ (1 200 000,00)
Ativo Fixo Líquido	\$ 1 080 000,00	\$ 960 000,00	\$ 840 000,00	\$ 720 000,00	\$ 600 000,00	\$ 480 000,00	\$ 360 000,00	\$ 240 000,00	\$ 120 000,00	\$ 0,00
TOTAL DO ATIVO	\$ 1 230 815,85	\$ 1 256 788,25	\$ 1 277 626,60	\$ 1 293 022,84	\$ 1 302 650,46	\$ 1 306 163,34	\$ 1 303 194,59	\$ 1 293 355,32	\$ 1 276 233,28	\$ 1 251 391,53
PASSIVO										
Capital Próprio	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00	\$ 1 200 000,00
Lucro Acumulado	\$ 30 815,85	\$ 56 788,25	\$ 77 626,60	\$ 93 022,84	\$ 102 650,46	\$ 106 163,34	\$ 103 194,59	\$ 93 355,32	\$ 78 233,28	\$ 51 391,53
TOTAL DO PASSIVO	\$ 1 230 815,85	\$ 1 256 788,25	\$ 1 277 626,60	\$ 1 293 022,84	\$ 1 302 650,46	\$ 1 306 163,34	\$ 1 303 194,59	\$ 1 293 355,32	\$ 1 276 233,28	\$ 1 251 391,53

CAPÍTULO 5 - CÁLCULO DO PAYBACK E VPL (CENÁRIO 1)		
Anos	Capitais	Dados Gerais
0	(\$ 1.200.000)	Custo do Capital - k : 15%
1	\$ 150.816	Resultados PBS = 9,46 anos PBD (Acumulado (t=0)) = Não tem Payback PBD (Saldo do Projeto) = Não tem Payback VPL = (\$ 537.842,95)
2	\$ 145.972	
3	\$ 140.838	
4	\$ 135.396	
5	\$ 129.628	
6	\$ 123.513	
7	\$ 117.031	
8	\$ 110.161	
9	\$ 102.878	
10	\$ 95.158	

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICO FINANCEIRA (CENÁRIO 2) - VALORES EM US\$					
DADOS GERAIS					
	Valores	Crescimento			
Quantitativo de lâmpadas	3.960.000	0,00%			
Preço Unitário	\$ 0,23	0,00%			
Imposto de Renda	35,00%				
Custo do Capital	15,0% ao ano				
Períodos de Projeção	10 anos				
CUSTOS VARIÁVEIS E FIXOS					
				CV	CF
	Crescimento >	6%			
Mão de Obra	\$ 137.687,00	100%		100%	0%
Materia-Prima		100%		100%	0%
Energia Elétrica	\$ 18.000,00	100%		100%	0%
Manutenção	\$ 9.000,00	0%		0%	100%
Outros	\$ 9.000,00	0%		0%	100%
Custos totais	\$ 173.687,00				
CV total	\$ 155.687,00				
CF total	\$ 18.000,00				
INVESTIMENTO DE CAPITAL					
Equipamento	\$ 1.720.907,00				
Instalação	\$ 65.116,00				
Outras despesas	\$ 21.279,00				
Investimento Total	\$ 1.807.302,00				
DESPESAS					
Aluguel					
Telefone e Agua	\$ 18.000,00				
Material de Escritório	\$ 9.000,00				
Outras I	\$ 3.600,00				
Outras II	\$ 0,00				
Total	\$ 30.600,00				
Crescimento	6,00%				
CÁLCULO DO VPL, TIR E PAYBACK					
Custo do Capital					15,0%
VPL	\$ 672.819,91				
TIR	24,55%				
PAYBACK	5,45 anos				

CAPÍTULO 5 - CÁLCULO DO PAYBACK E VPL (CENÁRIO 2)

Anos	Capitais	Dados Gerais
0	(\$ 1.807.302)	<i>Custo do Capital - k : 15%</i>
1	\$ 522.489	
2	\$ 515.224	Resultados
3	\$ 507.523	<i>PBS = 3,52 anos</i>
4	\$ 499.360	<i>PBD (Acumulado (t=0)) = 5,48 anos</i>
5	\$ 490.707	<i>PBD (Saldo do Projeto) = 5,45 anos</i>
6	\$ 481.534	<i>VPL = \$ 672.819,91</i>
7	\$ 471.812	
8	\$ 461.506	
9	\$ 450.582	
10	\$ 439.002	

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO 3) - VALORES EM USD\$

DADOS GERAIS		Valores	Crescimento	INVESTIMENTO DE CAPITAL	
Quantitativo de lâmpadas		3.960.000	10,00%	Equipamento	\$ 1.720.907,00
Preço Unitário		\$ 0,23	0,00%	Instalação	\$ 65.116,00
Imposto de Renda		35,00%		Outras despesas	\$ 21.279,00
Custo do Capital		15,0% ao ano		Investimento Total	\$ 1.807.302,00
Períodos de Projeção		10 anos			
DESPESAS					
				Aluguel	
				Telefone e Agua	\$ 18.000,00
				Material de Escritório	\$ 9.000,00
				Outras I	\$ 3.600,00
				Outras II	\$ 0,00
				Total	\$ 30.600,00
				Crescimento	6,00%
CÁLCULO DO VPL, TIR E PAYBACK					
				Custo do Capital	15,0%
				VPL	\$ 1.950.731,80
				TIR	35,28%
				PAYBACK	4,25 anos

CAPÍTULO 5 - CÁLCULO DO PAYBACK E VPL (CENÁRIO 3)

Anos	Capitais	Dados Gerais
0	(\$ 1.807.302)	Custo do Capital - k : 15%
1	\$ 522.489	
2	\$ 574.426	Resultados
3	\$ 631.847	PBS = 3,11 anos
4	\$ 695.318	PBD (Acumulado (t=0)) = 4,28 anos
5	\$ 765.463	PBD (Saldo do Projeto) = 4,25 anos
6	\$ 842.969	VPL = \$ 1.950.731,80
7	\$ 928.592	
8	\$ 1.023.166	
9	\$ 1.127.609	
10	\$ 1.242.935	

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO 4) - VALORES EM USD\$					
DADOS GERAIS		Valores	Crescimento		INVESTIMENTO DE CAPITAL
Quantitativo de lâmpadas		3.960.000	20,00%		Equipamento \$ 1.720.907,00
Preço Unitário		\$ 0,23	0,00%		Instalação \$ 65.116,00
Imposto de Renda		35,00%			Outras despesas \$ 21.279,00
Custo do Capital		15,0% ao ano			Investimento Total \$ 1.807.302,00
Períodos de Projeção		10 anos			
CUSTOS VARIÁVEIS E FIXOS					
				CV	
		Crescimento >		CF	
Mão de Obra		\$ 137.687,00	100%	0%	Aluguel \$ 18.000,00
Materia-Prima			100%	0%	Telefone e Agua \$ 9.000,00
Energia Elétrica		\$ 18.000,00	100%	0%	Material de Escritório \$ 3.600,00
Manutenção		\$ 9.000,00	0%	100%	Outras I \$ 0,00
Outros		\$ 9.000,00	0%	100%	Outras II \$ 0,00
Custos totais		\$ 173.687,00			Total \$ 30.600,00
CV total		\$ 155.687,00			Crescimento 5,00%
CF total		\$ 18.000,00			CÁLCULO DO VPL, TIR E PAYBACK
					Custo do Capital 15,0%
					VPL \$ 3.987.325,44
					TIR 45,39%
					PAYBACK 3,66 anos

CAPÍTULO 5 - CÁLCULO DO PAYBACK E VPL (CENÁRIO 4)

Anos	Capitais	Dados Gerais
0	(\$ 1.807.302)	Custo do Capital - k : 15%
1	\$ 522.489	
2	\$ 633.827	Resultados
3	\$ 768.431	PBS = 2,85 anos
4	\$ 931.014	PBD (Acumulado (t=0)) = 3,69 anos
5	\$ 1.127.234	PBD (Saldo do Projeto) = 3,66 anos
6	\$ 1.363.882	VPL = \$ 3.987.325,44
7	\$ 1.649.114	
8	\$ 1.992.721	
9	\$ 2.406.455	
10	\$ 2.904.423	

CAPÍTULO 5 - CÁLCULO DO PAYBACK E VPL (CENÁRIO 5)

Anos	Capitais	Dados Gerais
0	(\$ 1.807.302)	Custo do Capital - k : 15%
1	\$ 522.489	
2	\$ 663.229	Resultados
3	\$ 840.534	PBS = 2,74 anos
4	\$ 1.063.629	PBD (Acumulado (t=0)) = 3,49 anos
5	\$ 1.344.048	PBD (Saldo do Projeto) = 3,46 anos
6	\$ 1.696.216	VPL = \$ 5.410.223,78
7	\$ 2.138.169	
8	\$ 2.692.458	
9	\$ 3.387.276	
10	\$ 4.257.875	

ANEXO IV

PROPOSTA DE RESOLUÇÃO AO CONAMA

INTRODUÇÃO

O arcabouço legal para o controle e preservação dos recursos ambientais no Brasil começou a ser esboçado no final da década de 1930, com a edição dos Códigos de Águas, de Minas, de Águas Minerais, de Florestas e de Pesca. Daquela data em diante, a legislação ambiental brasileira passou por um processo evolutivo muito significativo, tendo ganhado novo caráter e deixado para trás o tratamento jurídico fragmentado e personalizado que prevalecera até a promulgação da Constituição Federal de 1988.

De fato, a Lei Maior do país, de forma inédita e pioneira, dedicou um capítulo específico ao tema do meio ambiente – o Capítulo VI. Em seu artigo 225, *caput*, estabelece que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida”. Os oito incisos do parágrafo primeiro deste artigo, visando assegurar a efetividade do direito de que trata o *caput*, estabelecem como incumbência do Poder Público o “controle da produção, da comercialização e do emprego de técnicas, métodos e substâncias que comportem risco para a vida, para a qualidade de vida e para o meio ambiente”.

Antes da Constituição, a Lei Federal nº 6.938/81, que viria a ter a sua redação modificada pelas Leis Federais nºs 7.804/89 e 8.028/90, dispôs sobre a Política Nacional de Meio Ambiente e estruturou o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama), do qual fazem parte, entre outros, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), que é órgão consultivo e deliberativo, e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), que é órgão executivo.

Dentre os objetivos do Ibama (2001), definidos para o cumprimento de sua missão institucional, destaca-se o de “promover a adoção de medidas de controle de produção, utilização, comercialização, movimentação e destinação de substâncias químicas e resíduos potencialmente perigosos”.

Já o Conama, através do regimento interno instituído pela Portaria nº 326 do Ministério do Meio Ambiente Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA), de 15/12/94, tem por finalidade:

Art. 1

“I, - assessorar, estudar e propor a instâncias superiores do Governo diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e recursos ambientais;

II - deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida.”

Com apoio no suporte legal existente e nos objetivos e finalidades definidos para o Ibama e o Conama, apresenta-se, nesta parte final da tese, proposta de resolução visando a que se tenha no Brasil uma legislação federal específica sobre um tipo particular de resíduo: aquele constituído pelas lâmpadas de mercúrio.

EMBASAMENTO TEÓRICO

Dois trabalhos de pesquisa gerados por esta tese serviram como embasamento teórico para a formulação dessa proposta:

Contamination of the environment by the current disposal methods of mercury-containing lamps in the State of Minas Gerais, Brazil

Trata-se de uma pesquisa recente realizada no Estado de Minas Gerais envolvendo a problemática sobre o descarte de lâmpadas de mercúrio nos setores público, industrial, comercial e hospitalar. Ficou evidenciado nessa pesquisa que têm sido adotadas medidas e práticas de descarte de resíduos totalmente errôneas, as quais têm contribuído, ainda que de maneira involuntária/inconsciente, ao longo dos anos, para a contaminação de ecossistemas e, acarretando riscos e efeitos deletérios à saúde humana.

Existe uma lacuna na legislação ambiental brasileira, a qual tem permitido e/ou contribuído para isso. Percebe-se que as empresas privadas e órgãos públicos desconhecem, de modo geral, os efeitos adversos causados pelo mercúrio e, em decorrência da ausência de uma legislação específica, tais empresas/órgãos não sabem como gerenciar seus resíduos perigosos, nem como quantificá-los.

Classificação dos resíduos gerados por lâmpadas de mercúrio quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública

Trata-se de uma pesquisa realizada com o intuito de caracterizar e classificar os diversos tipos de resíduos gerados por lâmpadas de mercúrio. Três deles mostraram-se merecedores de atenção: (1) vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio; (2) pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes e (3) *pellet* de vidro sílica de lâmpada a vapor de mercúrio.

O vidro do bulbo externo (aproximadamente 70% da massa total de uma lâmpada de vapor de mercúrio) contém concentrações significativas de chumbo, na maioria dos casos, excedendo o limite regulatório estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 10.004, Anexo G, Listagem nº 7. Este tipo de vidro, constitui, ao lado do mercúrio, o material potencialmente perigoso em lâmpadas de descarga. Pelas normas brasileiras, o resíduo proveniente de uma lâmpada a vapor de mercúrio deve ser classificado como resíduo perigoso – Classe I, caracterizado como tóxico TL, em teste de lixiviação (Norma ABNT NBR 10.005), e código de identificação D008.

O pó de fósforo (aproximadamente 2% da massa total de uma lâmpada fluorescente) contém mercúrio e cádmio, e constitui o material potencialmente perigoso neste tipo de lâmpada. Os testes de lixiviação para o mercúrio, levando-se em consideração toda a massa da lâmpada e, conseqüentemente a diluição do material potencialmente perigoso, conforme estabelece a Norma ABNT NBR 10.005, geraram incertezas devido à complexidade da natureza física do resíduo, erros associados à preparação de amostras e dificuldades encontradas no procedimento de filtração da lixívia. Os testes foram considerados insuficientes e inconclusivos para o enquadramento destes tipos de resíduos, em conformidade com o Anexo G, Listagem nº 7, Norma ABNT NBR 10.004. Não obstante, constatou-se que os resíduos de lâmpadas fluorescentes nos EUA exibem a característica de periculosidade para o mercúrio, em testes de TCLP, para um limite regulatório de 0,2 mg de Hg por litro de lixívia do resíduo. Tal fato forçou o aprofundamento dessa pesquisa, pois o limite regulatório brasileiro de 0,1 mg.L⁻¹, em testes de lixiviação – Norma ABNT NBR 10.005, é muito mais conservador do que aquele. Face às dificuldades apontadas, o material potencialmente perigoso foi analisado em separado e, em seguida, os resultados foram ajustados à massa total da lâmpada e comparados ao limite listado no Anexo I, Listagem nº 9, Norma ABNT NBR 10.004 (100 mg de Hg/kg de massa bruta de resíduo).

Dessa forma, ficou evidenciado que algumas lâmpadas usadas/queimadas possuem concentrações de mercúrio que excedem o limite regulatório brasileiro. As concentrações são extremamente variáveis de lâmpada para lâmpada, independentemente do fabricante, sendo, geralmente, mais elevadas no pó de fósforo de lâmpadas usadas/queimadas do que no mesmo material em lâmpadas novas. Além da elevada concentração de mercúrio neste tipo de resíduo, devem ser considerados como fatores agravantes; (a) a persistência química do mercúrio, (b) seu potencial de migrar do resíduo para o meio ambiente, sob condições impróprias de manuseio, (c) sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação em ecossistemas e (d) sua toxicidade. Assim, os resíduos de lâmpadas fluorescentes, com concentrações de mercúrio acima do limite regulatório e com nítidas características de periculosidade, devem ser classificados, conforme norma brasileira de resíduos sólidos, como resíduos perigosos – Classe I. Já os testes preliminares de lixiviação e solubilização para o cádmio mostraram que as concentrações deste metal em resíduos de lâmpadas fluorescentes estão abaixo dos limites regulatórios previstos na Norma ABNT NBR 10.0004. Conseqüentemente, se as concentrações de cádmio se mantiverem nesses patamares e levando-se em consideração apenas este metal, tais resíduos são classificados como resíduos inertes – Classe III.

O *pellet* de vidro sílica, em lâmpada a vapor de mercúrio, contém mercúrio elementar, sob a forma líquida. Este *pellet* (30 gramas em média, equivale, aproximadamente, a 12% da massa total de uma lâmpada) é extremamente duro e difícil de ser amostrado sem que haja perda de material. Por esta razão, os resíduos gerados por este tipo de lâmpada, no que diz respeito ao mercúrio, não foram objeto de estudo na pesquisa realizada. Não obstante, levando-se em consideração, por exemplo os conteúdos médios de mercúrio de 60 mg (lâmpada de 400 W, fabricada pela Philips) e 75 mg (lâmpada de 400 W, fabricada pela Sylvania), conforme dados apresentados no *Mercury study report to Congress, volume II: An inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States* (Usepa 1997b), e a massa média por lâmpada, da ordem de 250 g, as concentrações de mercúrio calculadas na massa bruta do resíduo são de 240 e 300 mg/kg, respectivamente. No Brasil, tais resíduos são classificados pela Norma ABNT NBR 10.004 – Anexo I, Listagem nº 9, como resíduos perigosos – Classe I, pois apresentam concentrações acima do limite regulatório (100 mg de Hg/kg de resíduo). Como nesses tipos de lâmpadas não existem registros, mesmo nos EUA, de que as concentrações de mercúrio tenham

sofrido sensíveis reduções nos últimos anos, a situação brasileira pode ser até mais delicada em consequência da inexistência de fiscalização junto aos fabricantes de lâmpadas.

DIRETRIZES APONTADAS PELAS PESQUISAS PARA O GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

Considerando-se as características de periculosidade dos resíduos de lâmpadas de mercúrio para os metais mercúrio e chumbo e a fragilidade das lâmpadas em si, tornam-se necessárias as seguintes considerações a respeito do gerenciamento desses tipos de resíduos:

- ☐ O maior perigo que ocorre durante o gerenciamento dos resíduos de lâmpadas de mercúrio diz respeito, primeiro ao vapor de mercúrio, e segundo ao mercúrio metálico, os quais são liberados assim que as lâmpadas são quebradas. As quantidades de vapor e mercúrio metálico aumentam na proporção direta do número de lâmpadas quebradas. Além do mais, o mercúrio contido, principalmente no pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes pode ser liberado para o meio ambiente por um período de tempo cuja rapidez será função das condições físico-químicas (temperatura, pH, umidade etc) do meio em que se encontra. Formas mais oxidadas de mercúrio podem ser facilmente convertidas a metilmercúrio por influência de bactérias anaeróbias do tipo metanogênicas. O metilmercúrio assim formado, por ser extremamente tóxico, pode contaminar ecossistemas e produzir efeitos deletérios à saúde humana.
- ☐ As lâmpadas inservíveis devem ser mantidas intactas, acondicionadas e armazenadas, preferencialmente em suas embalagens originais ou colocadas em *containers* especiais de aço ou de ferro fundido para estocagem até a sua destinação final. As lâmpadas quebradas, inclusive aquelas acidentalmente quebradas, e o pó de fósforo que se desprende das lâmpadas fluorescentes quebradas devem ser imediatamente separados por meio de um sistema de coleta a vácuo e acumulados em *containers* especiais dotados de filtros de carvão ativado, capazes de reter eventuais emanações de mercúrio.
- ☐ Os resíduos devem ser estocados em áreas separadas e demarcadas como área de acumulação de resíduos perigosos. Em nenhuma hipótese as lâmpadas devem ser quebradas para serem armazenadas, o que pode contaminar o ambiente e expor o trabalhador a riscos à saúde.

- ☐ Cuidados especiais devem ser observados nas operações que envolvam o carregamento, o manuseio e o transporte de *containers* ou *pallets* de lâmpadas, evitando-se choques e tombamentos, os quais poderiam ocasionar a implosão de muitas lâmpadas.
- ☐ Quanto à saúde ocupacional e à segurança no trabalho, a legislação brasileira, através das Normas Regulamentadoras (NR) do Ministério do Trabalho e Emprego (Mtb 2001) estabelece como limites:
 - a) de tolerância biológica para o ser humano, a taxa de 35 µg de mercúrio por grama de creatinina urinária e 10 mg de chumbo por grama de creatinina urinária (Programas de Controle Médico de Saúde Ocupacional/NR-7, Anexo I, Quadro I);
 - b) de tolerância no ambiente de trabalho, a taxa de 0,04 mg de mercúrio por metro cúbico de ar e 0,1 mg de chumbo por metro cúbico de ar, para 48 horas semanais de exposição (Atividades e Operações Insalubres/NR-15, Anexo 11, Quadro 1).

Em locais fechados, o ambiente de trabalho deve ser monitorado, com registros duas vezes ao dia. Os trabalhadores que manuseiam grandes quantidades de lâmpadas devem usar equipamentos de proteção individual (EPI) tais como macacão sanitário e luvas de PVC, botas de borracha, óculos de segurança e respirador Confo II com filtro químico para mercúrio. Os trabalhadores devem ser impedidos de comer e fumar durante as operações que envolvam o gerenciamento dos resíduos de lâmpadas e, ainda serem submetidos a exames médicos periódicos, incluindo a determinação de mercúrio e avaliação neurológica, para as pessoas expostas de forma repetida.

- ☐ Em locais contaminados, procedimentos específicos devem ser adotados como, por exemplo:
 - (a) usar soluções aquosas de sulfeto de cálcio (CaS) sobre o material espalhado em consequência da quebra acidental de lâmpadas objetivando inibir a vaporização do mercúrio,
 - (b) limpar as superfícies expostas com solução de fosfato de sódio (Na₃PO₄) e (c) utilizar esponjas absorventes de mercúrio (Ecolights Northwest 1998).
- ☐ Com referência ao transporte das lâmpadas de mercúrio como resíduos, deve-se levar em consideração dois pontos básicos: (a) a característica de periculosidade apresentada pelo resíduo (Resíduo Classe I) e (b) sua toxicidade para o mercúrio e para o chumbo. O transporte deste tipo de resíduo deve ser enquadrado, com base na Portaria 204, de 20 de maio de 1997,

do Ministério dos Transportes, na Classe 6 – substâncias tóxicas, infectantes e irritantes, mais precisamente, na Subclasse 6.1, números ONU 2024 e/ou 2025 (Ministério dos Transportes 1997). A simbologia de risco para manuseio e acondicionamento de transporte deve ser aplicada de acordo com a Norma ABNT NBR 7.500 – Transporte, Armazenagem e Manuseio de Materiais (Abnt 1983).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações a que se chega ao final dos levantamentos e pesquisas realizados são:

- ☐ No Brasil, o descarte dos resíduos de lâmpadas de mercúrio vem sendo feito, preferencialmente, no lixo comum. Existe uma lacuna a respeito do assunto na legislação brasileira, o que tem permitido ou contribuído para a adoção de medidas totalmente errôneas e inadequadas, as quais vêm provocando, certamente, ao longo dos anos, a contaminação de ecossistemas e efeitos deletérios à saúde humana.
- ☐ Embora a reciclagem seja uma atividade já presente em nosso país, somente uma pequena parcela do setor produtivo, interessado na certificação pelas Normas ISO 14.000, é que se utiliza desta atividade. O ônus por essa descontaminação vem sendo suportado por empresas geradoras do próprio resíduo. O setor público, considerado o maior gerador deste tipo de resíduo, salvo raríssimas exceções, não está, ainda, imbuído da necessidade de descontaminá-lo.
- ☐ Os resíduos de lâmpadas de mercúrio são resíduos perigosos – Classe I, porque apresentam concentrações de mercúrio e chumbo que excedem os limites regulatórios estabelecidos pela Norma Brasileira de Resíduos Sólidos – ABNT NBR 10.004.
- ☐ Especificamente, os resíduos de lâmpadas fluorescentes apresentam características de periculosidade para o mercúrio, enquanto as lâmpadas de alta intensidade, particularmente as de vapor de Hg apresentam, duplamente, características de resíduos perigosos – Classe I: primeiro pelo mercúrio contido nestes produtos e, segundo pelo chumbo existente nos bulbos externos de vidro e em soldas. Esses resíduos necessitam ser manuseados e destinados adequadamente. Isso é de vital importância, na medida em que se considera o ciclo de vida destes produtos, pois é na fase de destinação final (descarte) que se verifica a maior contribuição de impacto ao meio ambiente.

Quanto à legislação referente ao descarte de resíduos de lâmpadas, tem-se que:

- ☐ A legislação federal norte-americana considera os resíduos de lâmpadas de mercúrio como resíduos perigosos, pois muitas lâmpadas usadas/queimadas são reprovadas nos testes de TCLP, cujo limite regulatório para o mercúrio é de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. De acordo com a regra final, em vigência a partir de 6 de janeiro de 2000, estes resíduos devem ser gerenciados com as mesmas regulamentações válidas para os resíduos universais (regulamentações aplicáveis, por exemplo a certos tipos de produtos que contêm mercúrio, como: baterias, pesticidas, termostatos etc.).
- ☐ A legislação brasileira para o descarte de resíduos de lâmpadas de mercúrio está segmentada e restrita a uma lei estadual (Rio Grande do Sul), a dois projetos de lei estaduais (Bahia e Minas Gerais) e a uma lei municipal (cidade de São Paulo). Somente as lâmpadas fluorescentes são objeto destas legislações, o que deixa de fora as lâmpadas de vapor, igualmente consideradas resíduos perigosos – Classe I. Além do mais, as legislações estaduais fazem menção ao gerenciamento de resíduos de lâmpadas em conjunto com outros tipos de resíduos, tais como baterias de telefone celular e pilhas. Ora, as lâmpadas possuem características que as diferenciam de outros produtos, principalmente em termos de concentrações de mercúrio e chumbo, fragilidade do produto em si e dificuldade de serem mantidas intactas, o que justificam a necessidade de gerenciamento mais específico.
- ☐ A tendência explicitada nos projetos de lei em tramitação acompanha a legislação vigente nos principais países da Comunidade Européia, ou seja, a responsabilidade pelos resíduos é da competência dos fabricantes (fabricante poluidor). Entretanto, o que vem sendo praticado aqui no Brasil é o contrário, ou seja, o gerador do resíduo (usuário poluidor) é que tem arcado com o ônus da descontaminação, numa nítida tendência à adoção do sistema existente nos EUA.
- ☐ A legislação brasileira de resíduos sólidos (Norma ABNT NBR 10.004) considera o limite regulatório para o mercúrio de 100 mg de Hg/kg de massa bruta de resíduo ou $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, em testes de lixiviação (Norma ABNT NBR 10.005). Este limite é a metade do limite regulatório norte-americano, o que deixa dúvidas quanto à qualidade ambiental dos produtos similares importados e quanto à adequação dos resíduos por eles gerados à norma brasileira de resíduos sólidos em vigência. Este quadro pode agravar-se ainda mais se forem considerados, por

exemplo, os produtos similares importados provenientes de países asiáticos (China, Taiwan, Coréia do Sul etc.).

- Não existe legislação mais abrangente, em nível federal, para o gerenciamento desses tipos de resíduos, que contemple manuseio, coleta, estocagem, transbordo, transporte e tratamento ou disposição final.

PROPOSTA DE RESOLUÇÃO AO CONAMA

Considerando: (1) as características de persistência química, toxicidade, potencial de migrar do resíduo para o meio ambiente e capacidade de bioacumulação do mercúrio e chumbo, principalmente em climas tropical e subtropical como o nosso; (2) as características específicas e fragilidade das lâmpadas de mercúrio; (3) os impactos negativos causados à saúde pública e ao meio ambiente pelo descarte não-controlado de tais tipos de lâmpadas; (4) as concentrações de mercúrio e chumbo presentes nos resíduos de lâmpadas de mercúrio, em valores que excedem os limites regulatórios previstos na norma brasileira de resíduos sólidos - ABNT NBR 10.004 -, e (5) a necessidade de procedimentos especiais e diferenciados para tratar as lâmpadas e seus resíduos, propõe-se ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) que seja elaborada uma *Resolução* com o propósito de atender aos limites da referida Norma. Para tanto, é imprescindível uma ação conjunta, envolvendo representantes de fabricantes de lâmpadas, pesquisadores, recicladores e órgãos ambientais fiscalizadores, a fim de que se possa ter, no Brasil, uma resolução federal específica, a exemplo do que ocorre com outros tipos de resíduos - Resolução Conama 257/99 para pilhas e baterias usadas (Conama 1999).

Na elaboração dessa Resolução, quatro pontos básicos deverão ser priorizados:

1) A fabricação e importação de lâmpadas deverão atender aos seguintes limites:

- até 0,01% em massa de mercúrio, quando forem dos tipos fluorescentes, fluorescentes compactas, vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores metálicos;
- até 5,0 mg.L⁻¹ de chumbo (limite máximo no lixiviado), em testes de lixiviação de resíduos, conforme Norma ABNT NBR 10.005, quando forem dos tipos vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores metálicos;

- até 0,5 mg.L⁻¹ de cádmio (limite máximo no lixiviado), em testes de lixiviação de resíduos, conforme Norma ABNT NBR 10.005, quando forem dos tipos fluorescentes e fluorescentes compactas.

Considerando as características específicas do mercúrio (inclusive sua alta volatilidade), singularidade dos resíduos, e dificuldades, erros de amostragem, diluições/atenuações inerentes aos testes de lixiviação, propõe-se que o mercúrio seja dosado na massa bruta do material poluente das lâmpadas, ou seja, no pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes e no *pellet* de vidro sílica de lâmpadas tipo HID. Dessa forma, é possível calcular e ter o controle efetivo do mercúrio contido nas lâmpadas.

Ademais, o mercúrio sendo uma substância química persistente, bioacumulável e tóxica (*Persistent Bioaccumulative Toxic Chemicals*), relacionada com o Código U151 – Anexo F - Listagem nº 6 e no Anexo D - Listagem nº 4 da Norma ABNT NBR 10.004, justificaria, por si só, enquadrar os resíduos de lâmpadas de mercúrio como resíduos perigosos de fontes não-específicas, no Anexo A - Listagem nº 1, da aludida Norma¹.

2) O gerenciamento ambientalmente adequado para esses tipos de resíduos, no que tange ao seu manuseio, coleta, estocagem, transbordo, transporte e disposição final, objetivando reduzir os efeitos deletérios à saúde humana e garantir o equilíbrio de ecossistemas.

As diretrizes apontadas para o gerenciamento dos resíduos de lâmpadas de mercúrio deverão ser transcritas para o corpo dessa Resolução.

Com relação ao descarte ficam proibidas as seguintes formas de destinação final:

- lançamento “*in natura*” a céu aberto, tanto em áreas urbanas como rurais;
- queima a céu aberto ou em incineradores e coprocessadores;

¹ A Norma ABNT NBR 10.004 está sendo objeto de revisão por Grupo de Trabalho (GT) coordenado por Ana Cristina Karl, do Ministério do Meio Ambiente – MMA (Brasília). O autor desta Tese encaminhou sugestão a esse GT no sentido de incluir os resíduos de lâmpadas de mercúrio como resíduos perigosos de fontes não-específicas, no Anexo A - Listagem nº 1.

ANEXO A - Listagem nº 1 – Resíduos perigosos de fontes não-específicas			
Indústria	Código do resíduo perigoso	Resíduo Perigoso	Código de periculosidade
Genérica	F... (a ser definido)	Resíduos de lâmpadas de mercúrio (fluorescentes tubulares, circulares, compactas, a vapor de mercúrio, vapor de sódio, mista e multivapores metálicos), que contêm mercúrio, cádmio e chumbo.	(T)

- lançamento em corpos d'água, praias, manguezais, terrenos baldios, fossas, poços ou cacimbas, cavidades subterrâneas e em redes de drenagem de águas pluviais e esgotos;
- reutilização do tubo de vidro de lâmpadas fluorescentes para fins artesanais (fabricação de pingômetros, castiçais etc.).

Quanto aos resíduos gerados, os órgãos ambientais deverão envidar esforços para promulgar as melhores técnicas (*Best Demonstrated Available Technology – BDAT*), evitando-se com isso a proliferação e uso de equipamentos (processadores) sem dispositivos de controle de emissões de mercúrio e adoção de práticas inadequadas como, por exemplo a incineração, diluições residuais etc.

3) A destinação adequada das lâmpadas inservíveis, em aterros de resíduos perigosos (Classe1) e/ou por reciclagem, será assumida:

- a) pelos geradores de resíduos nos setores industrial e público;
- b) pelos fabricantes de lâmpadas nos setores comercial, hospitalar, residencial e geradores de pequeno porte nos setores industrial e público;
- c) pelos importadores, mediante taxaço de cunho ambiental, no ato da importação dos produtos.

Cabe aqui fazer os seguintes comentários:

A pesquisa apresentada nesta Tese apontou os setores industrial e público como os maiores geradores de resíduos de lâmpadas fluorescentes e de descarga de alta intensidade, respectivamente. Nesses setores existe uma consciência ambiental sobre a necessidade de se ter um sistema controlado de descarte e gestão de resíduos, razão pela qual a descontaminação já é uma prática voluntária, que está sendo adotada, ainda que timidamente. Esses setores devem, então, assumir a responsabilidade pela gestão dos seus resíduos, em atenção ao Princípio para a Sustentabilidade do Poluidor-Pagador.

O principal desafio é a descontaminação nos setores comercial, hospitalar, residencial e pequenos geradores nos setores industrial e público que, sabidamente, são menos organizados e não possuem uma estrutura de gestão de seus resíduos. Esses setores descartam, praticamente, todas as lâmpadas diretamente no meio ambiente. Para esses setores, os fabricantes devem assumir a responsabilidade em atenção ao Princípio para a Sustentabilidade da Responsabilidade Estendida pelo Produto. As lâmpadas usadas/queimadas chegariam aos fabricantes ou aos seus

prepostos por meio da estrutura inversa de comercialização dos produtos, ou seja, varejistas – revendedores – atacadistas. Deverão ser criados mecanismos de coleta eficiente e diferenciada em virtude das características específicas e fragilidade dos produtos, e de incentivo para que os consumidores possam também participar. Os consumidores receberiam um incentivo financeiro na forma de um desconto (bônus) a cada lâmpada nova comprada mediante devolução de uma usada/queimada. Essa responsabilidade financeira, certamente, cria um incentivo econômico para que os fabricantes adaptem a concepção dos seus produtos aos pré-requisitos de uma gestão de resíduos correta. No caso do importador, o Ibama (órgão fiscalizador) e demais órgãos envolvidos deverão dar anuência à operação de importação. Os produtos sofrerão uma taxaço de cunho ambiental (Princípio da Responsabilidade Estendida pelo Produto), a qual será recolhida aos cofres da União Federal e equivaleria, por exemplo, ao custo médio de reciclagem praticado por recicladoras brasileiras no ano civil anterior à aludida operação. Parte dessa taxaço seria revertida como crédito tributário junto à estrutura inversa de comercialização para cobrir o custo inerente à descontaminação, e parte como bônus ao consumidor, quando da compra de uma lâmpada nova mediante devolução de uma usada/queimada. Os órgãos anuentes e de proteção e defesa do consumidor - Procon deverão fiscalizar e monitorar os fabricantes e/ou importadores para que os mesmos não repassem ao custo final dos produtos o ônus correspondente à descontaminação dos resíduos gerados. Os fabricantes, por sua vez, deverão conduzir estudos para reduzir os conteúdos de cádmio, chumbo e mercúrio a valores mais baixos possíveis tecnologicamente. A idéia é que, com esse sistema híbrido, envolvendo consumidores, geradores de resíduos, fabricantes e importadores, seja possível desviar ao máximo o fluxo de resíduos de lâmpadas do gerenciamento de resíduos não-perigosos, nos aterros e lixões, sob a responsabilidade do Poder Público Municipal.

4) Os incentivos fiscais e parafiscais ao desenvolvimento sustentável para a atividade de de-mercurização dos resíduos de lâmpadas de mercúrio, principalmente para a reciclagem, como forma de descontaminar o meio ambiente e propiciar a reutilização dos subprodutos oriundos dessa atividade.

Por fim, adverte-se que a inserção de uma ampla campanha de educação ambiental, com esclarecimentos a respeito do assunto, é de vital importância para a necessária conscientização das comunidades, empresários e governantes.

ANEXO V



Contamination of the environment by the current disposal methods of mercury-containing lamps in the state of Minas Gerais, Brazil

Claudio Raposo ^{a,*}, Hubert Mathias Roeser ^b

^a*Nuclear Technology Development Center - CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck s/n, Cidade Universitária — Pampulha, 30 123-970 Belo Horizonte, Brazil*

^b*Department of Geology - DEGEO/UFOP, Mining School, Federal University of Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, Campus Universitário, 35,400-000 Ouro Preto, Brazil*

Received 10 April 2000; accepted 27 September 2000

Abstract

This survey describes the degree of environmental contamination resulting from the current disposal methods of mercury-containing lamps. The territory studied for this purpose is the federal state of Minas Gerais, one of the most populated areas in the Brazilian federation of states. The results of this survey derive in part from answers received to a questionnaire mailed out to industrial firms, commercial business enterprises, hospitals and departments of public work. The sampling technique used was a nonprobabilistic (purposive sampling). Three types of disposal were found to prevail: (1) as an addition to corporate waste disposal (garbage), (2) recycling and (3) disposal by other methods. Overall, our study shows that the majority of mercury lamps are being disposed in the metropolitan area of Belo Horizonte, primarily by the public sector, followed by industrial, commercial and hospital sectors. Although recycling constitutes a relatively high fraction of the disposal methods, we find Federal regulations in Brazil regarding the disposal of hazardous, mercury-containing lamps to be far behind the state of technological achievement. This gap has permitted the adoption of disposal measures that are obsolete, incorrect, and a primary cause for the extensive contamination of the ecosystems with harmful effects to human health. © 2001 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Mercury-containing lamps; Waste disposal; Recycling; Contamination; Ecosystems

1. Introduction

The release of mercury into the environment, its introduction into the biochemical cycle, and its concentrated propagation along the food chain due to changes in climate are a worldwide concern, primarily in industrialized countries. Global warming is expected to accelerate mercury remobilization and bioaccumulation in several environments and ecosystems with subsequent increases in the risk of exposure to humans [1]. Indeed, the release of mercury into the environment due to poorly regulated disposal methods of mercury-containing products has been noted especially in areas adjacent to high concentrations of populations [2]. The indiscriminate disposal of mercury lamps (fluorescent and high intensity discharge [HID]) has caught particular

attention. The increasing magnitudes of contaminated waste, inadequately managed, are expected to seriously compromise the environment and provoke harmful effects upon human health.

In Brazil, the contamination of urban waste by mercury due to inadequate disposal has not as yet been appraised. As such, it has drawn the attention of researchers at the Environmental Geochemistry and Waste Disposal of the Nuclear Technology Development Center (CDTN), and at the Geology Department of the Federal University of Ouro Preto (UFOP). Minas Gerais was chosen for obvious reasons. It is permeated extensively by industry, businesses, service providers, and public institutions that represent the vast throngs of the population on which the economy depends.

The acute and long-range neurological effects due to mercury poisoning are insidious. We recall the devastation to the population of Minamata in Japan when the local Chisso Corporation started, in 1906, to discharge mercury-containing sludge into the bay of the fishing

* Corresponding author.

E-mail addresses: raposoc@urano.cdtm.br (C. Raposo), hubert@degeo.ufop.br (H.M. Roeser).

village, thus contaminating fish caught for human consumption. As of 1992, the number of people officially diagnosed as having the “Minamata disease” totaled 2252 people; 1043 were dead and another 12,127 people were waiting to be tested [3,4]. More recently, dangers to human health from mercury poisoning by silver amalgam fillings have caused this type of dental cavity repair to be outlawed throughout most of the world [5]. Presently, mercury accumulation in fish and other organisms of the human food chain must be less than 1 ppm, [6]. For hazardous waste, the regulatory limit for mercury adopted by Brazilian Legislation is 100 ppb, which corresponds to half of the value adopted by American Federal Legislation [6,7].

2. Objective and methodology

The study at hand strives to document and quantify the current disposal methods for mercury-containing lamps in the State of Minas Gerais, the types of lamps used and the sources of these waste products that generate harmful waste, to the extent that is possible from the questionnaires and public records.

To achieve the desired objective, but lacking statistical data as well as prior in-depth studies on the subject matter, the approach first considered was to develop a *quantitative research* domain, capable of being populated with data free of researchers’ intervention. In this way, it was felt that it should be possible to obtain quick insight into the prevailing disposal practices and attitudes within sectors of the respective social strata concerning the contamination of the environment by mercury-containing urban waste in a relatively short span of time.

The methodology ultimately chosen, as better fitting for the intended purpose was the *survey research*, widely used in the field of social science and marketing research [8]. It permits, more convincingly, the identification of important parameters that characterize the prevailing environmental contamination caused by the current disposal methods of mercury-containing lamps.

3. Preliminary considerations

Prior to our investigative research of primary data, we conducted a desk research with secondary information to be better guided on how best to approach our work.

3.1. Urbanization of the Minas Gerais State

Minas Gerais, is located at the southwest region of Brazil (Fig. 1). This region attracts 40.9% of the entire population and produces over 60% of the country’s industrial output. Minas Gerais is the second largest Brazilian territory with a population count of



Fig. 1. Geographic location of Minas Gerais State, Brazil [10].

16,672,613 inhabitants, and one of the richest states of the Federation. Its Consumer Potential Rate (IPC)¹ is of about 8.507, third best of the country. Belo Horizonte, the capital of Minas Gerais State, is the focal point for human settlements with a current metropolitan population of some 3,432,800 inhabitants [9,10].

3.2. Brazilian production of mercury-containing lamps

The production of mercury-containing lamps in Brazil is about 48.5 million units/year; of which 32.0 million are fluorescent, 7.5 million compact-fluorescent, and 9.0 million of the electric-discharge design (Na, Hg vapor and multi-vapors), [11]. Four big manufacturers control the market: Osram, Philips, General Electric and Sylvania. Taking into consideration these figures for the domestic production of lamps and a population of 157 million, the consumption of mercury-containing lamps in Brazil is 0.3 lamps per person, or about one ninth that of the USA with 2.9 lamps per person [12].

3.3. Estimates for the indiscriminate disposal of mercury lamps in the environment

We estimate that the discarding of lamps following useful service numbers about 48.5 million units per year, assuming that the production rate equals the disposal rate. Considering that the average amount of mercury per lamp is being reported as 20.62 mg of Hg/lamp [11], we arrive at the amount of mercury being discharged into the environment each year as 1000 kg.

¹ Consumer Potential Rate — referred to as IPC in this article in order to define it in terms of the Brazilian economy where it stands for *Índice Potencial de Consumo*, which defines as a percentage the purchasing power of each state or city in relation to the country or any of its states, respectively. [9].

3.4. Main disposal sites for mercury lamps

All around the world, the main disposal sites for waste are near the big metropolitan regions and nearby industrial centers — which in Brazil are the extensive urbanized regions of the Southwest (São Paulo, Rio de Janeiro and Belo Horizonte).

3.5. Main disposal sectors

Studies conducted in the USA and the United Kingdom show that the industrial, commercial and public sectors are dominant in the utilization of mercury-containing lamps, [13,14]. As an analogy, and in order to be all-inclusive, our study in Brazil also considers the utilization and disposal by hospitals. The residential sector has not been an object of this work because it involves, as is known, only an insignificant consumption of mercury-containing lamps and is very difficult to estimate.

3.6. Specifications for mercury-containing lamps types

In order to quantify the disposal of mercury into the environment, our research distinguishes among the diversity of sizes and shapes of lamps, only two types:

- fluorescent lamps (FL): 40 W power, 1.22 m length and 1.5" diameter, representing all the fluorescent and compact-fluorescent lamps, and
- discharge lamps (DL): 400 W power, representing high-pressure vapor lamps.

According to information from ABILUX, vapor lamps (also called discharge or HID) are more extensively used in the public sector for the illumination of large areas, while fluorescent and compact fluorescent lamps are used elsewhere.

4. Results of our research

For the survey of the selected sectors noted above, we contacted the respective entities and received good cooperation with the collection of data, especially from:

- Minas Gerais Industry Federation (FIEMG), representing the industrial sector;
- Minas Gerais Commerce Federation (FCEMG), commercial sector;
- Minas Gerais Hospitals Association (AHMG), hospital sector, and
- Minas Gerais Municipals Association (AMM), cities general administrations — City Halls.

Following the preliminary planning of the project, problem definition, objective, and method of data collection, we prepared a questionnaire for the quantitative

investigation of our research. Prior to large-scale dissemination, we carried out a pre-test sampling of the questionnaire with a small group of select companies and public departments to improve upon the wording of the questionnaire and its understanding by the recipients, to enhance the correct interpretation of returns. The revised questionnaire was subsequently mailed by postal services, and electronically by e-mail, to the producers, vendors and consumers of mercury-containing lamps, its manufacturing plants, commercial enterprises, hospitals and representative offices of the public sector (municipal, state and federal). The research effort was started in October 1998 and finished in January 2000.

4.1. The questionnaire

The survey letter contained an introductory passage explaining its intended purpose, followed by three basic questions, of which the first was used for identification, the second was multiple-choice and mutually exclusive, and the third was quantitative, Table 1.

4.2. Sample plan

4.2.1. Survey of the industrial sector

We selected companies according to their size, relative market position, and geographic location. A total of 514 companies were chosen. Of these, 331 are situated in the Belo Horizonte metropolitan region, the focal point of our attention because of its high population density. Of the remaining recipients in the industrial sector, 22 are located to the north, 22 to the east, 65 to the south, and 74 to the west of Belo Horizonte.

4.2.2. Survey of the public sector

Here we directed our survey to the city halls, or centers of the Municipal General Administration with populations greater than 30,000 inhabitants, as well as to the municipal, state and federal departments present in Belo Horizonte, numbering 70 and 50, respectively.

4.2.3. Survey of hospitals and the commercial sector

Here we established contact with the most important 234 hospitals and 247 commercial centers serving AHMG and FCEMG.

4.3. Evaluation of returns and results of the survey

Data from the returned survey questionnaire were tabulated and grouped by computer according to the pre-established sectors of inquiry with descriptive statistical techniques. The derivative results are:

4.3.1. Data evaluation

In addition to the preliminary considerations noted earlier, the following parameters were used in the evaluation

Table 1
Questionnaire

Question 1

What is the name and main activity of your company/department?

Question 2

How do you proceed mercury-containing lamps disposal in your company/department?

Straight in the garbage? _____ By recycling them? _____ If by any other type, specify: _____

Question 3

How many lamps do you dispose of in your company/department each month?

Fluorescent lamps: _____ Mercury and/or sodium vapor lamps: _____

of the questionnaire data: (1) relative importance of the selected sectors; (2) differential organization capacity of the companies or public department, and (3) attention to those entities that had adopted methods for the recycling of the discarded mercury-containing lamps.

The sampling of the data was systematic and may be called *nonprobabilistic (purposive sampling)*², [8,15], because it has been obtained through voluntary human response to a questionnaire and because the sampling was with a purpose in mind (e.g. the main sectors of our economy and the companies or public departments that are more readily accessible).

From the total of 1115 questionnaire-letters sent out, 341 were returned. This represents an overall response rate of 31%. The public sector showed the highest return of 44%, followed by the industrial sector with the smallest returns of 22%. The healthcare and commercial sectors provided 31 and 41%, respectively.

It is obvious that private companies and public departments are not aware of the harmful effects of mercury in environment. This may be caused in part, by the lack of specific laws that control the disposal of mercury-containing consumer products³. These organizations simply do not know how to dispose of waste containing hazardous substances and how to quantify their methods of disposal. Consequently, they are reluctant to release potentially incriminating factual information. This probably explains the high percentage of withheld responses to the questionnaire: 69%.

4.3.2. Profile of companies and public departments surveyed

The *industrial sector* targeted in this survey was represented by firms engaged in a wide spectrum of large-scale production, manufacture or processing of

steel, paper, cellulose, mining, car assembly, commercial construction, residential housing, fabrication of electrical transformers, fertilizers, refractory materials, ceramics, food, telecommunications, cement, beer, dairy products, and metal works. The *hospital sector* had respondents from hospitals, clinics and health care centers, maternity wards, health clubs and sanitariums. The *commercial sector* was represented by commercial institutions such as banks, private high schools, shopping malls, cooperatives, universities, and wholesalers, groceries/supermarkets and other services. Finally, the *public sector*, including municipal, state and federal agencies, was represented by administrative offices serving municipalities with more than 30,000 inhabitants, public meeting places, banks, military facilities, federal post offices, and miscellaneous corporations.

4.3.3. Current disposal methods of mercury-containing lamps

In Table 2 the average monthly disposals of mercury-containing lamps at the 351 companies and public departments that responded to the mailed questionnaire are shown. It accounts for a total monthly disposal of some 90,718 lamps of which 58% are fluorescent lamps and 42% discharge lamps. According to the replies from all respondents, 64% are concentrated in the polarized region⁴ of Belo Horizonte with a total monthly disposal of 44,452 lamps (49%). This uneven distribution of disposal inferred by our study may reflect the imbalance of per-capita-income, characteristic of the degree of industrialization and pervasive economic development in the State of Minas Gerais. Table 2 also points out that in hospitals and in the commercial-industrial sectors, over 90% of the disposals are represented by fluorescent lamps, while in the public sector some 64% are noted as discharge lamps. The public sector is, with 64%, by far the biggest disposer, followed by the industrial sector with 25%, the commercial sector with 8%, and hospitals with 3%. The predominant disposal rates by

² The difference between nonprobability and probability sampling is that nonprobability sampling does not involve random selection and probability sampling does [15].

³ Concerning the Brazilian Legislation, a federal legislation does not exist that specifically treats the discard of mercury lamps. In the state ambit, there are three legislation: Rio Grande do Sul State Legislation (Law 11019/1997), Bahia State Legislation (Law Project 11305/1997) and Minas Gerais Legislation (Law Project 4/1999 — Substitutive 1) [16].

⁴ Polarized region is the one that puts together different places subordinated to a dominant urban nucleus or center coming from economical and political-administrative dependence and interdependence links and the cristalization of functional relations among places [17].

Table 2
Monthly disposal rates of mercury-containing lamps^a

Disposal type	No. of companies surveyed					No. of lamps disposal									
	Sector					Fluorescent lamp				Discharge lamp				Total	%
	P	H	C	I	Total	P	H	C	I	P	H	C	I		
Garbage	42	68	102	74	286	18,615	2396	7002	6939	4940	120	257	461	40,730	45
Recycling	3	-	-	25	28	260	-	-	12,282	29,166	-	-	610	42,318	47
Other	8	5	-	14	27	1858	618	-	2254	2470	9	-	461	7670	8
Sub total	53	73	102	113	341	20,733	3014	7002	21,475	36,576	129	257	1532	90,718	100
Total						52,224				38,494					
%	16	21	30	33	100	58				42					

^a P, Public; H, Hospital; C, Commercial; I, Industrial.

the public sector are indicative of the high number of discharge lamps used for the illumination of public spaces and the relatively large number of public organizations who responded to our survey.

4.4. Statistics on the prevailing methods of disposal

As expected, the prevailing discarding of burned-out, mercury-containing lamps (fluorescent and HID) takes place as follows in three ways: (1) straight into the garbage (45%), (2) by recycling (47%) and, (3) by other methods (8%). Methods (1) and (3) that contaminate the environment contribute 53% of the direct lamp disposal.

In Fig. 2 the monthly disposal by all four of the sectors surveyed, are shown in absolute terms, where the representative percentages for each sector are indicative of their disposal method used. In the *commercial sector*,

100% of the entire disposal proceeds straight into the garbage contaminating the environment; in the *hospital sector*, all disposal also proceeds straight into the environment, intermixed with garbage (80%) or by other means (20%); the *public and industrial sectors* practice the highest recycling with 51 and 56%, respectively — but dispose the balance of their lamps by other methods that contaminate the environment. From the overall total of respondents, only a few engage in the recycling of generated waste: three in the public sector (1%), and 25 in the industrial sector (7%). It is likely that companies that have adopted recycling as the preferred method for the disposal of mercury-containing lamps also had the greatest interest in responding to the mailed questionnaire. Please note, that sectors mindful about the preservation of a healthy ecological environment already represent a significant percentage of the

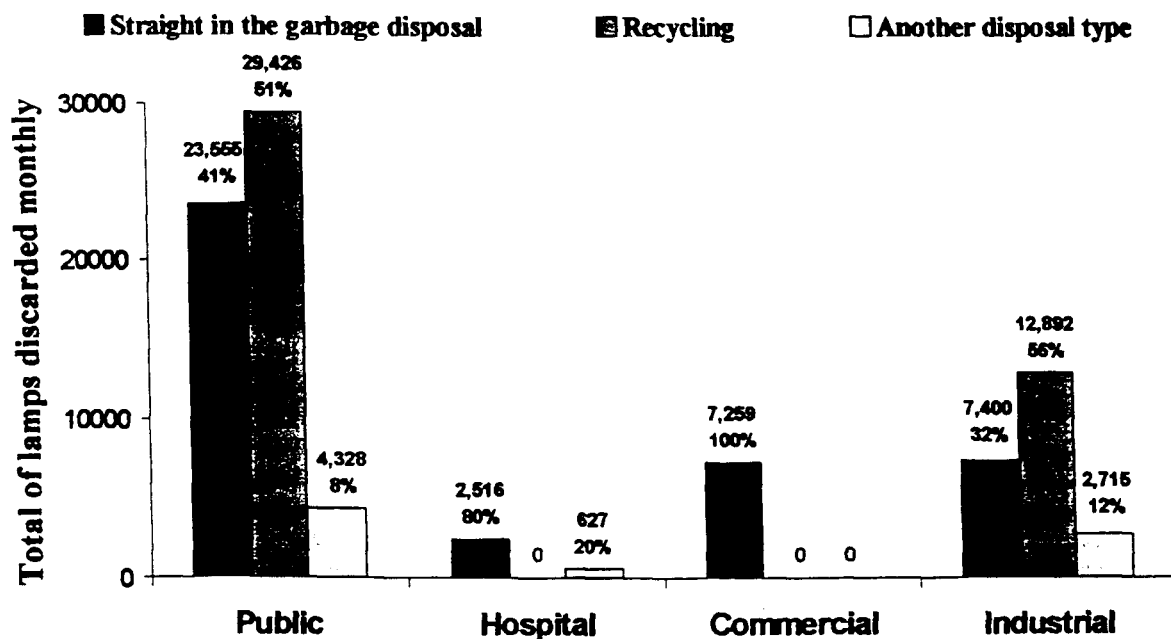


Fig. 2. Total number of mercury-containing lamps disposed monthly in each of the sectors surveyed (percentage are accounted by sector), shown according to disposal types.

economy. Hospitals and the commercial sectors do not share this observation. However, although the percentage of recycled lamps is high, the actual number of lamps being recycled by hospitals and commercial firms is low. Attention to the preservation of a healthy environment should, therefore, be directed to the public and industrial sectors that together contribute to the contamination of the environment with the disposal of some 37,998 lamps/month. This corresponds to 42% of the total disposal of mercury-containing lamps.

In addition to the quantitative aspects of lamp disposal, this survey, made raises important qualitative aspects of lamp disposal, which we cite as follows:

1. First, disposal *straight into the garbage bins* shows the least concerns about the environment. Corporations and public entities dispose of their mercury lamps in this manner, intermixed with their general waste, utilizing the municipal garbage disposal services for the removal of the discards from their premises. The glass envelopes of lamps usually get broken even before arrival at their final destination of the landfills and dumping grounds which are under the jurisdiction of municipal entities.
2. Second, *recycling*⁵ of mercury-containing lamps protects the environment and involves demercurization of the mercury-containing lamps. This type of processing is currently available only through one disposal service company in Brazil, which utilize chemical process⁶. The adoption of this method incurs costs (from USD\$ 0.28 to USD\$ 0.50 per lamp, plus freight and packing costs), provided by companies that are accredited to comply with an "environmental management system" normally certified by ISO 14,000 standards, and by companies that strive to utilize better practices of waste management, [16,20].
3. Third, *other disposal methods*, different from the previous ones, include indefinite storage of mercury-containing lamps, but also harm the environment in the long run and bring risk to human health. In this case, the survey disclosed the following types of mercury-lamp disposal methods:

⁵ The recycling refers to the series of activities by which discarded materials are collected, sorted, processed and converted into raw materials and used in the production of new products [18].

⁶ Chemical process involves the removal of aluminum end caps and tubes washing or crushed tubes, followed by the subsequent separation of the several components by means of operations which includes: (1) screening, (2) centrifugation, (3) decantation, (4) chemical treatment with sodium sulphite, sodium bisulphite or equivalent material; the mercury is reduced to produce mercury sulfide, a water insoluble solid, (5) filtration and (6) ion exchange. From these treatments result hydroxide and salts that are later separated [19,20].

In private landfills; old and out-of-use wells; destroyed and buried in the ground; incinerated in hospitals with other hazardous materials; discarded in metal works (30% in garbage, 40% in converters, and 30% in scum containers); disposed in waste bins of the mining industry; destroyed with other refuse in metal drums; stored in the original packages themselves and stored in sheds; dropped off in junk yards; discarded in raw-material stacks at cement factories; burned on corporate dumping grounds and given away to service companies that replace burned-out lamps under contract.

It is obvious that the majority of these practices for the disposal of mercury-containing lamps pose a real threat to the environment and to the surrounding ecosystems; other prevailing practices provoke harmful effects to workers when lamps are burned in hospital incinerators or are left for disposal by electric service personnel. Finally, the storing of burnt-out lamps in sheds is costly. It decreases corporate revenues and retains uncertainty as to the ultimate fate of lamp disposal.

In general, we wish to point out that respondents did not indicate awareness for the need of special handling of mercury-containing lamps. Many of the respondents noted that their disposal method included the breaking of lamps prior to disposal into garbage bins, or by other means that contaminate the environment in ways that are even more harmful.

1. The replacement of lamps used for the illumination of public roadways, streets, intersections, promenades and public parking is usually carried out by an electric power company that provides maintenance services to many municipalities. This is the biggest, single source of lamp disposal in the state of Minas Gerais,
2. Cement factories normally discard their lamps into streams of raw material that get mixed with limestone and clay to feed the clinker furnaces of the cement manufacturing process.
3. In the fabrication of appliances, different branches of the same company are seen to discard their lamps by different methods in the garbage and/or through recycling. These methods are completely opposite in their effect upon the environment.
4. Hospitals and health care providers do not use recycling as a means for disposal; their most common method of disposals is the garbage bin or incineration. One of their respondents also registered the discarding of mercury-containing lamps in an abandoned water well, connected to the underground water table that provides the water supply for human consumption in Serra do Curral Hill, Belo Horizonte.

5. In many firms, the manual replacement of burnt-out lamps and the periodic exchange of all lamps toward the end of their estimated life, are made under contract by service companies. These service providers discard such lamps straight into the firm's garbage disposal bins or dumpsters without consent, and without warning about the potential harm of their action.
6. As a rule, companies do not allocate funds for the recycling of lamps by return to the manufacturer in their original shipping containers, or for indefinite storage in sheds.
7. Many companies are resisting the release of potentially incriminating data, fearing to expose themselves to potential lawsuits aimed at protecting the environment. This introduces a bias to the results of our survey because the originators of the responses received are likely to be less aware of the potential hazards of their actions.
8. Many lamp disposal companies complained of difficulties in adopting effective programs for recycling because of the high cost of such disposal methods. These costs include the repackaging of lamps, their transportation to the recycling plant, and demercurization services. There is also the risk of accidents and spillage during transport with public attention by the news media on the resulting hazards of contamination. Waste disposal companies, except in rare cases, do not carry transport insurance.
9. Research to establish a practical cost-effective means for the safe disposal of mercury-containing lamps has received considerable support from private companies and public institutions. The goal is to explore practical alternatives to the harm of present practices.

4.4.1. Statistics of the subject survey

The rate of individual lamp disposal by respondents ranges from a minimum of one lamp/month to a maximum of 10,000 units/month for fluorescent lamps, and 29,166 units/month for discharge lamps, as shown in Table 3.

Considering the overall disposal by the four sectors, our study shows that there are common trends and characteristics: (1) huge data variability and strong asymmetry for the representative curves of disposal (global and individualized by sector); (2) similarity of graphic representations for methods of disposal concentrated in geographic areas close to their origin.

In Table 3 the extreme values and sum totals for lamps disposed in several sectors and for different types of lamps are listed. Position measure calculations show pretty different values for the mean and median. The median does not show extreme values (outliers) and is pretty much the prevailing method of disposal, especially

when there are huge differences between disposal quantities among small and big contributors to lamp disposal. Strong disposal heterogeneity is shown by the high values of the standard deviation and variation coefficient. A value that better characterizes the disposal of mercury-containing lamps (fluorescent and discharge lamps) is 26 lamps/month. For the method of direct lamp disposal into the environment, this value is about 20 lamps/month. The difference between these two values is due to recycling. For reference, 90% of companies and public utilities in the state of Minas Gerais are estimated to discard their mercury-containing lamps in the percentiles of 5 (P_{05}) and 95 (P_{95}).

Overall, 90% of the companies and public utilities discard monthly between two and 688 mercury-containing lamps, of which 0–490 lamps are discarded directly into the environment. It is pertinent to note that only three respondents discard 44,016 lamps/month (29,166 and 10,000 units by the public sector and 4850 by private firms), which represents 49% of the total discard volume. This is much greater than the cited estimate calculated above for Minas Gerais. These respondents are considered outliers and should be separated from the others. Median value calculations shown in Table 3 support this conclusion.

4.5. Protection of company-proprietary data

This survey started a databank which includes hundreds of pieces of data and information about: sources of environmental contamination by mercury-containing lamps, their names, addresses, types and quantities of discarded lamps. This beginning was made possible thanks to the support received from industry (FIEMG, FECMG and AHMG), the encouragement by federal research centers (CDTN/CNEN) and the Geological Department at the Federal University of Ouro Preto. To protect privacy of company proprietary data submitted by the respondents to our survey, some of the information was not identified by name.

4.6. Disposal in Minas Gerais and the polarized region of Belo Horizonte

Lacking specific statistics about lamp consumption and disposal for each region or the Brazilian States, an alternative approach was to make an estimate based on the IPCs. If one assumes the disposal of lamps in Brazil to be 48.5 million units per year, and an IPC rate for Minas Gerais of 8.507, one arrives at a disposal estimate for the entire state of Minas Gerais of 4,125,895 lamps/year or 343,825 lamps/month. In the regions of high disposal in Belo Horizonte (its capital and surrounding municipalities), the local IPC is only 41% of that for the entire State, [9,10]. This is remarkable because the calculated disposal percentage of 49% and the value of

Table 3
Reference values and numerical synthesis for fluorescent and discharge lamps showing monthly disposals in the state of Minas Gerais^a

Variable lamp/month	Sector	Min.	Max.	Standard deviation	CV (%)	Mean	Median	Percentile	
								P ₀₅	P ₉₅
FL	Public	0	10,000	1387	355	391	100	20	1277
	Industrial	1	4800	520	273	190	33	3	892
	Hospital	1	580	86	209	41	15	3	118
	Commercial	1	1600	205	293	70	8	1	261
	Global analysis	0	10,000	643	417	154	20	2	522
DL	Public	0	29,166	4011	581	690	0	0	1450
	Industrial	0	231	33	241	14	1	0	50
	Hospital	0	20	4	240	2	0	0	11
	Commercial	0	50	8	323	3	0	0	20
	Global analysis	0	29,166	2661	836	318	12	0	280
FL + DL	Public	20	29,166	4189	387	1081	125	29	2340
	Industrial	1	4850	524	258	204	40	4	922
	Hospital	1	580	86	200	43	20	3	118
	Commercial	1	1624	208	293	71	9	1	254
	Global analysis	1	29,166	1708	642	266	26	2	688
FL + DL (in the environment)	Public	0	10,000	1449	275	526	120	12	1920
	Industrial	0	1100	186	208	90	20	0	343
	Hospital	1	580	86	200	43	20	3	118
	Commercial	1	1624	208	293	71	9	1	254
	Global analysis	0	10,000	612	431	142	20	0	490

^a CV, variation coefficient (%) = [(standard deviation)/mean] × 100; P₀₅, percentile 5; P₉₅, percentile 95; FL, fluorescent lamp; DL, discharge lamp (vapor).

41% for the IPC of this region of the state are fairly close. This allows us to conclude that the monthly disposal in this region may well approach 45% of the total of lamps discarded in the entire state. If we proceed with a calculation based on average percentiles, we arrive at a monthly discard of 154,721 lamps/month for the metropolitan area of Belo Horizonte. This implies a monthly disposal rate for mercury of about 3.19 kg/month, of which 1.69 kg/month are discarded in ways that are likely to harm the environment with potential risks to human health.

4.7. Disposal estimates for other Brazilian States

Today, few data are available concerning the disposal of mercury-containing lamps in Brazil. Despite the scarcity of information, let us assume that the disposal characteristics for other Brazilian States can be extrapolated as a first estimate from the data derived from this survey for the state of Minas Gerais, i.e., a median discard of 26 lamps/month, and the published official IPC for each state of Brazil, Table 4.

The projected estimates for the south and southwest regions were obtained from a direct relationship between median discard and the IPC. On this basis, we

Table 4
Consumer Potential Rate (IPC) for each state of Brazil [9]

State	Consumer Potential Rate (IPC) — %
Espírito Santo	1.451
Minas Gerais	8.507
Paraná	5.621
Rio de Janeiro	11.626
Rio Grande do Sul	7.083
Santa Catarina	3.059
São Paulo	34.065

show in Fig. 3 that the estimated maximum median disposal rate of mercury-containing lamps/month, for each company or public department, should be about 104 in São Paulo, 36 in Rio de Janeiro, 22 in Rio Grande do Sul, 17 in Paraná, nine in Santa Catarina and four in Espírito Santo.

The authors believe that because of exogenous factors influencing the IPCs, the calculations may slightly *underestimate* the disposal rates of lamps in the *more* affluent states of Rio de Janeiro and São Paulo, and *overestimate* the disposal of mercury-containing lamps in the *less* affluent States and territories of Brazil.

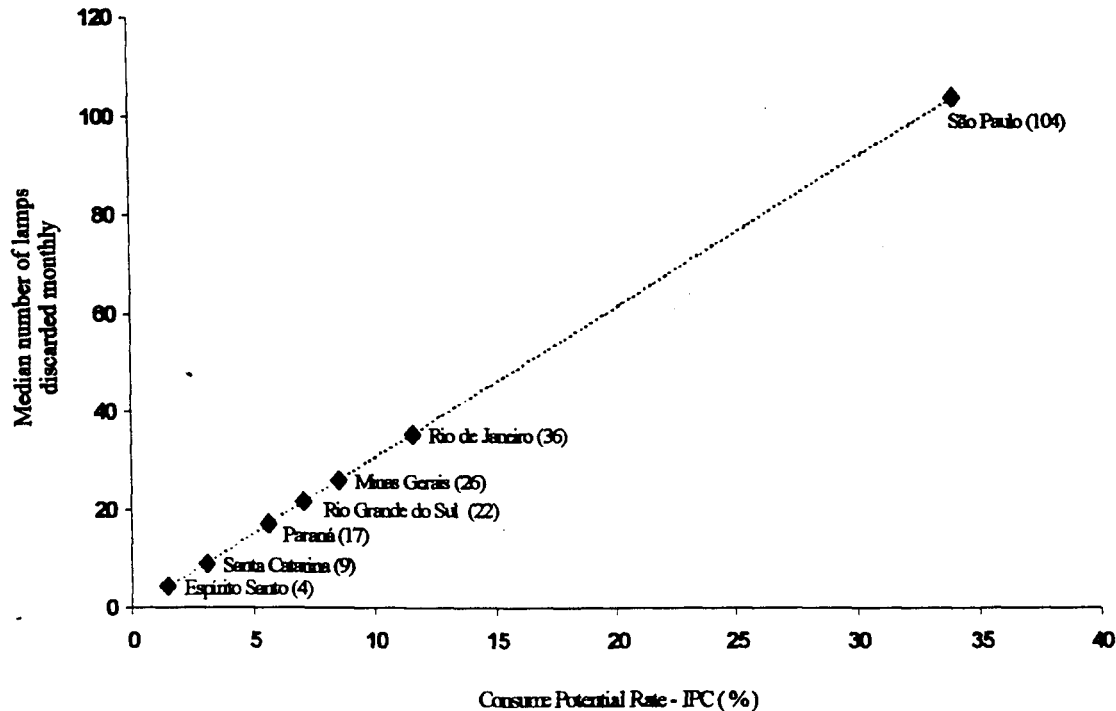


Fig. 3. Projected estimate for the median number of lamps discarded monthly (fluorescent lamps and discharge lamps) in several Brazilian states, inferred from the median value calculated for Minas Gerais taking into account the Consume Potential Rate (IPC) of the correspondent states.

5. Conclusions

Our study of the disposal of mercury-containing lamps in the State of Minas Gerais, and its extrapolation to other regions of Brazil shows, generically, that survey data may also be applied to the geosciences in studies related to the protection of the environment.

Despite its *quantitative* approach, the survey supports important *qualitative* conclusions about the micro- and macro-environment affected by the discarding of mercury with the disposal of burnt-out lamps. The lack of data on the recycling of mercury-containing lamps, which is apparent from the low returns to our questionnaire, indicates a general apprehension by industrial firms, municipalities, and public utilities of exposing their current disposal methods; methods that are likely to harm the environment and pose risks to human health. Here, the public sector is by far the biggest offender, followed closely by industry, commerce, and health providers. There is a pronounced concentration of lamp disposal in the metropolitan area of Belo Horizonte. This concentration is certainly due to the imbalance of personal income per capita in the state and the consequent imbalance of consumption of goods and services. The calculated percentage of lamp disposal and the official IPC value for this region are fairly close. These average percentiles were used to estimate the disposal for the entire region of Minas Gerais. A surprising aspect of our study shows a high percentage of lamps being allegedly recycled rather than discarded into the

environment, where recycling is obviously preferred worldwide to protect the environment and human health. This observation indicates a growing awareness by the public at large regarding the hazards of environmental contamination, and by industrial firms, municipalities, and public utilities concerned about the preservation of a healthy environment, despite the absence of specific federal regulation.

The statistics shows huge variance among the data received, strong asymmetry of representative curves in each sector analyzed, and concentrations of data points near the origins of lamp dispersal and consumption. The heterogeneity of disposal is inferred from the high standard deviation and variation in the value of coefficients. The median value, which is less affected, by the extreme values of outliers was taken as the measure to better characterize the disposal of mercury-containing lamps.

The scarcity of data in this subject field, and its lack of accuracy, indicates a general reluctance to release potentially incriminating information. This first topical survey demonstrates the need for follow-on research that may lead to guidelines and ultimately to federal and state laws. These regulations should address the management of acceptable risk arising from the disposal of mercury-containing waste, its handling, and transport. Future surveys and studies are expected to resolve the uncertainty arising from the unexpected high number of returns indicating "disposal by recycling". These data may turn out to be much lower when inferred from

a broader spectrum of respondents to questionnaires of future surveys. We conclude with this remark, that, although Brazilian legislation is very restrictive in terms of emissions standards for mercury, it is important to emphasize that for most of the cases this legislation is an adaptation from those adopted by developed countries. The results showed in this paper point out the importance of performing new research concerning the behavior of mercury in tropical and semitropical ecosystems. This study, together with all information presented here, could contribute to the establishment of limits and practices consistent with economic, social and environmental sustainability.

It is, therefore, incumbent upon state and government officials to fund ecological research and to mandate preventive legislation to protect our environment from irreversible contamination by hazardous materials and potentially catastrophic effects upon human health. Deleterious health effects are now reported from certain regions of the Russian Federation of States and from developing countries where the hazardous affects upon human health were neglected or willfully discounted in view of other priorities. All parties involved in the manufacture, sale, transport, and the disposal of mercury-containing lamps are well advised to develop best practices and self-regulation in anticipation of potential class actions by harmed individuals, and by states ultimately burdened with the cleanup of the environment at taxpayers' expense.

We appeal to the scientific community to engage in related studies that enhance our understanding of the ill effects upon human health caused by the indiscriminate disposal of hazardous materials. Federal and state agencies should be encouraged to establish, and to enforce equitable laws for the protection of the environment. Our health, and our children's, are clearly at stake.

Acknowledgements

The authors would like to thank the review assistance from Dr. Viktor E. Hampel (Network Security Laboratories, Inc.), East Coast, Virginia, USA. This manuscript has also benefited from the thoughtful and constructive comments of *Waste Management* reviewers.

References

- [1] Nriagu OJ. Global metal pollution poisoning the biosphere. *Environment* 1990;32:7–33.

- [2] Nriagu OJ. Mercury cycle and global climate change. In: 5th International Conference — Mercury as a global pollutant, Rio de Janeiro (Brazil), May 1999.
- [3] Center for Health, Environment and Justice (Citizen's Clearinghouse for Hazardous Waste Organization) Mercury poisoning: the legacy of Minamata, Japan, 1997. Available at: <http://www.essential.org/orgs/cchw/ehm/mar97.htm>.
- [4] Justus SL. Mercury poisoning: the Legacy of Minamata, Japan, technical report, 1998. Available at: http://www.members.tripod.com/~Sandra_Justus/MercuryPoisoningReport.html.
- [5] Department of Environment, Health and Natural Resources (N. C. Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance). Waste reduction and proper waste management of products containing mercury. OWR-96-30. June 1996. Available at: <http://www.owr.ehnr.state.nc.us>.
- [6] US Environmental Protection Agency. Background information on mercury sources and regulations. (Table 9: Environmental Standards for Mercury), 1998. Available at: <http://www.epa.gov/grtlakes/bnsdocs/mercsrce/mercreg.htm>.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987 (NBR 10.004). 63 p.
- [8] Babbie E. Métodos de pesquisa de survey. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999. [Translation of: Survey Research Methods, USA, 2nd ed., 1997, International Thomson Publishing Inc. 519 p].
- [9] Gazeta Mercantil. Atlas do mercado brasileiro. São Paulo: Gazeta Mercantil, vol. 1, No. 1, dezembro. 1998. (annual publication) pp. 106–109.
- [10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem da população 1996. Available at: <http://www.ibge.gov.br/estatistica>.
- [11] Illumination Industry Brazilian Association (ABILUX). Fax ABILUX, October/1998, São Paulo, for Cláudio Raposo, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte. Subject: Brazilian production of mercury lamps.
- [12] US Environmental Protection Agency. Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps — Final Report. Washington, DC, EPA, 1997. Available at: <http://www.epa.gov/epaoswer>.
- [13] National Electrical Manufacturers. The management of spent electrical lamps containing mercury. 2nd ed. New York, NY: NEMA, 1994, 16 p.
- [14] Eagle A. Government gives green light to old fluorescent tubes: a brilliant idea. 290/ENV, July 1997. Available at: <http://www.environment.detr.gov.uk>.
- [15] Trochim WMK. Nonprobability sampling. Research Methods Knowledge Base. 2nd ed. 1999. Available at: <http://trochim.human.cornell.edu/kb/sampon.htm>.
- [16] Raposo C. Brazilian Recycling Project for mercury lamps: pre-visibility report. CDTN/CNEN, Belo Horizonte, August 1999. (internal publication). 99 p.
- [17] Matos R. Distribuição espacial e desconcentração da população em Minas Gerais, no período 1980–1991. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, 1999 pp. 4–7.
- [18] National Recycling Coalition. Glossary references. 1995. Available at: <http://www.recycle.net>.
- [19] Raposo C, Carvalho FC. Recycling processes for mercury lamps — the state of the art, *Revista Química Nova*, Brazil (submitted for publication).
- [20] Apliquim. Manejo e disposição de lâmpadas contendo mercúrio — INS, São Paulo, 1999. Available at: <http://www.apliquim.com.br>.

Contaminação ambiental provocada pelo descarte de lâmpadas de mercúrio

Cláudio Raposo

CDTN/CNEN; E-mail:raposoc@urano.cdtm.br

Hubert Mathias Roeser

DEGEO/EM/UFOP; E-mail: hubert@degeo.ufop.br

Resumo

Esse trabalho tem o propósito de alertar a comunidade quanto aos problemas ambientais provocados pelo descarte crescente e indiscriminado de produtos contendo mercúrio, particularmente, pelas lâmpadas fluorescentes e de vapor (mercúrio e sódio).

Grande parte das informações aqui apresentadas foi extraída do contexto existente nos Estados Unidos da América, país onde a legislação e a infra-estrutura disponível vêm sendo discutidas, implantadas e/ou implementadas, desde o início da década de 80.

Palavras-chave: contaminação ambiental, mercúrio, lâmpadas de mercúrio (fluorescentes e de vapor)

Abstract

Energy efficient fluorescent lamps have gained widespread usage over the years compared to incandescent ones. This increasing use of mercury-contained fluorescent lamps has led to growing concerns over its proper disposal.

This paper provides information on lamp usage, regulations and guidelines on the proper disposal of fluorescent tubes and mercury vapor lamps.

Keywords: *fluorescent lamps; regulations; mercury vapor lamps*

1. Introdução

Assistimos, nesse final de milênio, a uma onda de mudanças adaptativas à nova ordem mundial. Entre estas, a mentalidade ambientalista reveste-se de especial relevância, na medida em que identifica-se com as necessidades de competitividade, produtividade, segurança e qualidade, passando, assim, a constituir-se em fator estratégico no mundo globalizado. E, por esses motivos, as questões ambientais passam a ser encaradas como oportunidades de desenvolvimento, seja pela aplicação de tecnologias ambientalmente seguras, seja pela racionalização do uso de recursos naturais. Um dos problemas ambientais que tem chamado a atenção pela sua gravidade é a contaminação causada pelo mercúrio. Esse elemento, devido às suas propriedades singulares, é um componente essencial utilizado em centenas de produtos. Entre eles, destacam-se os produtos medicinais e farmacêuticos, as pilhas, as baterias, as lâmpadas, os termômetros, etc. Embora o mercúrio tenha suas aplicações práticas, muitos cientistas comprovam que alguns de seus compostos são neurotoxinas potentes, que podem causar efeitos deletérios a organismos expostos a ele e quando, em altas concentrações, até danificar o sistema nervoso central do homem, [1].

Um exemplo trágico ocorreu na Baía de Minamata – Japão, na década de 1950, onde mulheres grávidas contaminaram-se com altos níveis de mercúrio através do consumo de peixes contaminados. Como resultado dessa contaminação, seus descendentes desenvolveram múltiplos sintomas neurológicos (microcefalia, hipoplasia e atrofia do cérebro).

2. Produtos que contêm mercúrio

Os produtos que contêm mercúrio, ao fim de sua vida útil, são considerados resíduos perigosos, porque ao serem lançados no meio ambiente podem contaminar solos, corpos d'água e ecossistemas. Na Tabela 1, estão relacionados os principais produtos que contêm mercúrio em resíduos sólidos urbanos mu-

nicipais. É importante salientar que a busca por maior eficácia e economicidade energética de fontes de luz artificial tem levado a substituição das lâmpadas incandescentes pelas de mercúrio, fato este que evidencia a necessidade de maior controle do descarte desse produto.

3. Informações básicas sobre as lâmpadas de mercúrio

Uma lâmpada fluorescente típica é composta de um tubo selado de vidro preenchido com gás argônio à baixa pressão (2,5 Torr) e vapor de mercúrio, também à baixa pressão parcial. O interior do tubo é revestido com uma poeira fosforosa composta de vários elementos. A Tabela 2 relaciona a concentração desses elementos em mg/kg da poeira fosforosa [3]. Espirais de tungstênio, revestidas com substância emissora de elétrons, formam os eletrodos em cada uma das extremidades do tubo. Quando a voltagem é aplicada, os elétrons passam de um eletrodo para outro, criando um fluxo de corrente, denominado de arco voltaico, ou descarga elétrica. Esses elétrons chocam-se com os átomos de argônio, os quais, por sua vez, emitem mais elétrons. Os elétrons chocam-se com os átomos do vapor de mercúrio e os ener-

gizam, causando a emissão de radiação ultravioleta (UV). Quando os raios ultravioletas atingem a camada fosforosa, que reveste a parede do tubo, ocorre então, a fluorescência, produzindo luz visível [4]. A lâmpada fluorescente mais usada é a de 40 watts (4 pés de comprimento = 1,22 m; diâmetro de 1.1/2”), embora outras de diferentes formas e tamanhos sejam também procuradas. O tubo usado numa lâmpada fluorescente padrão é fabricado com vidro, similar ao que é utilizado para a fabricação de garrafas e outros itens de consumo comum.

Os terminais da lâmpada são de alumínio ou plástico, enquanto os eletrodos são de tungstênio, níquel, cobre ou ferro. Nenhum desses materiais apresenta risco potencial de contaminação ambiental. A camada branca, normalmente chamada de fósforo, que reveste o tubo de uma lâmpada fluorescente, é geralmente um clorofluorofosfato de cálcio, com antimônio e manganês (1 a 2%). A quantidade desses componentes menores pode mudar ligeiramente, dependendo da cor da lâmpada. Uma lâmpada padrão de 40 watts possui cerca de 4 a 6 gramas de poeira fosforosa [4].

A vida útil de uma lâmpada de mercúrio é de 3 a 5 anos, ou um tempo de operação de, aproximadamente, 20.000 horas, sob condições normais de uso [5].

Tabela 1 – Produtos que contêm mercúrio em um resíduo sólido.

PRODUTO	PERCENTAGEM
Pilhas/Baterias	71,99
Equipamentos elétricos (lâmpadas de mercúrio e etc.)	13,70
Termômetros	6,89
Termostatos	3,30
Pigmentos	1,22
Produtos para uso odontológico	1,18
Resíduos de pintura	0,94
Interruptores de mercúrio	0,77
TOTAL	100,00

Fonte: EPA [2]

Tabela 2 – Análise de poeira fosforosa de uma lâmpada fluorescente.

Elemento	Concentração	Elemento	Concentração	Elemento	Concentração
Alumínio	3.000	Chumbo	75	Manganês	4.400
Antimônio	2.300	Cobre	70	Mercúrio	4.700
Bário	610	Cromo	9	Níquel	130
Cádmio	1.000	Ferro	1.900	Sódio	1.700
Cálcio	170.000	Magnésio	1.000	Zinco	48

Fonte: Mercury Recovery Services, in TRUESDALE et al. [3].

3.1 Conteúdo de mercúrio

A quantidade de mercúrio em uma lâmpada fluorescente varia consideravelmente, conforme o fabricante, fábricas diferentes de um mesmo fabricante, tipo de lâmpada e ano de fabricação.

Na Tabela 3 é mostrado o conteúdo de mercúrio segundo dados da NEMA – National Electrical Manufacturers Association [5] de uma lâmpada padrão americana de 4 pés (40 W), diâmetro de 1.1/2 polegadas. Estima-se para o ano 2.000 um decréscimo no conteúdo de mercúrio de, aproximadamente, 35% em relação a 1995. Em recente trabalho publicado pela EPA, foi divulgado que há uma expectativa de redução ainda maior entre o período de 2000 a 2007 [6]. Essas reduções no conteúdo de mercúrio advêm do avanço tecnológico do processo de fabricação. As lâmpadas de vapor de mercúrio, também chamadas de HID (High Intensity Discharge), podem possuir maior quantidade de mercúrio que as lâmpadas fluorescentes.

Testes realizados por fabricantes, nos EUA, mostram que uma lâmpada fluorescente padrão de 40 watts contém cerca de 20 mg de vapor de mercúrio a 20°C [3].

3.2 Produção e descarte de lâmpadas

Segundo a Associação Brasileira de Iluminação – ABILUX, a produção brasileira é de 48,5 milhões de lâmpadas [7]. O mercado é dominado por quatro empresas: OSRAM, Philips, General Electric e Sylvania. A relação entre o número de lâmpadas queimadas e o número de lâmpadas fabricadas é de, aproximadamente, 1:1.

Uma pesquisa preliminar sobre o descarte de lâmpadas fluorescentes, realizada junto às empresas e órgãos públicos, no entorno da Região Metropolitana de Belo Horizonte, destacou os seguintes quantitativos mensais:

- FIAT Automóveis (4.800);
- CEMIG (1.666);
- TELEMAR (1.600);
- CENIBRA (1.400);

- CERVEJARIA BRAHMA S/A (1.100);
- PIF-PAF ALIMENTOS (1.000);
- MANNESMANN (1.000);
- PUC-MG (1.000).

No que se refere às lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio e multivapores) utilizadas, preferencialmente, na iluminação pública, a CEMIG é de longe o maior gerador, com descarte de 350.000 lâmpadas/ano.

Nos EUA, a produção de lâmpadas de mercúrio é de 1 bilhão por ano, deste total 756 milhões são queimadas anualmente e o restante é exportado. Estima-se que 802 milhões de lâmpadas fluorescentes serão queimadas e descartadas nesse país, no ano 2000 [6].

4. Legislação ambiental e regulamentações

4.1 Nos EUA

As regulamentações sobre o manejo, transporte e disposição de lâmpadas e produtos contendo mercúrio estão previstas na Lei Federal *Resource Conservation and Recovery Act – RCRA* que proíbe a destruição de resíduos mercuriais em aterros ou incineração, quando a quantidade de mercúrio excede o conteúdo de 200 ppb (partes por bilhão) e o resíduo não passa pelo Procedimento de Lixiviação para Caracterização da Toxicidade (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure - TCLP*) [8]. A agência fiscalizadora federal é a EPA – *Environmental Protection Agency*, com escritórios de representação nos diversos estados norte-americanos. Outras regulamentações são feitas por leis estaduais, mais restritivas. Em julho de 1994, a EPA publicou uma regra destinada ao gerenciamento e administração para as lâmpadas contendo mercúrio (Documento 59 FR 39288).

Tabela 3 – Conteúdo de mercúrio em uma lâmpada de 40 W.

ANO	CONTEÚDO DE Hg (mg)	ANO	CONTEÚDO DE Hg (mg)
1985	48,2	1995	27
1990	41,6	2000	20

Fonte: NEMA [5]

Nessa regra, a Agência apresentou duas opções para mudanças nas regulamentações abaixo relacionadas:

- Acrescentar o descarte das lâmpadas de mercúrio às regulamentações válidas para o resíduo universal (regulamentações aplicáveis, por exemplo, a alguns tipos de baterias, pesticidas e termostatos - Documento 40 CFR Parte 273), inclusive todas as lâmpadas reprovadas no teste TCLP. Os lugares receptores desses resíduos perigosos (aterros sanitários ou recicladoras) estariam sujeitos às regulamentações de resíduos perigosos da RCRA.
- Condicionar, sob certas condições, o descarte das lâmpadas contendo mercúrio isento da regulamentação de resíduo universal:
 - 1) a disposição dessas lâmpadas somente seria possível em aterros destinados a resíduos sólidos aprovados pela EPA, ou
 - 2) o seu destino seria restrito às instalações de reciclagem, as quais deveriam ser licenciadas, aprovadas e registradas pelo estado norte-americano competente.

4.2 No Brasil

A regulamentação para o descarte de resíduos sólidos está centrada na Norma NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT [9]. O mercúrio, além de sua capacidade de bioacumulação e do seu potencial de migrar do resíduo para o ambiente, é classificado, conforme essa Norma, como Resíduo Classe I – Perigoso. É uma substância tóxica, Anexo F – listagem nº6, código de substância 151 e um poluente, com limite máximo no extrato de 0,001 mg.L⁻¹, em testes de solubilização. Ainda segundo essa Norma, no Anexo 1, listagem nº9, o mercúrio ou seus compostos não devem exceder o limite máxi-

mo no resíduo total em 100 mg de Hg.kg⁻¹. Se esse poluente exceder o limite máximo permitido, o resíduo deve ser disposto em instalações adequadas.

Em nível federal, a Resolução nº 257 de junho/99 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) trata do descarte de pilhas e baterias contendo mercúrio. Entretanto, no caso específico de lâmpada de mercúrio, não existe uma legislação federal e/ou regulamentação para o seu descarte. Nos âmbitos estadual e municipal, existem as seguintes legislações que tratam do descarte de produtos que utilizam mercúrio:

- Lei 11.187/98, do Estado do Rio Grande do Sul - dispõe sobre o descarte, fiscalização e destinação final de pilhas, baterias de telefone celular e lâmpadas fluorescentes.
- Projeto de Lei nº 11305/97, do Estado da Bahia - dispõe sobre o descarte de lâmpadas fluorescentes, baterias de telefone celular e relógios.
- Lei Municipal da Cidade de São Paulo nº 12.653/98 - dispõe sobre o descarte de lâmpadas fluorescentes na cidade de São Paulo.
- Projeto de Lei nº 4/99 (Substitutivo nº 1 - Emenda nº 1 à Lei nº 12.040/95), do Estado de Minas Gerais - dispõe sobre o descarte, reciclagem de lâmpadas fluorescentes, pilhas e baterias usadas.

5. Reciclagem de lâmpadas

Se o resíduo é incinerado ou aterrado, é importante manter os produtos que contêm mercúrio separados do lixo municipal. Tais produtos são, frequentemente, classificados como resíduos perigosos se excederem o limite regulatório de toxicidade (0,2 mg.L⁻¹).

Uma vez segregados e/ou separados, os resíduos mercuriais podem, então, ser tratados objetivando a recuperação do mercúrio neles contidos [10]. As opções de aterramentos e incinerações não são as mais recomendadas pela EPA. Com a finalidade de minimizar o volume de mercúrio descarregado ao meio ambiente, a opção de reciclagem, com a conseqüente recuperação do

mercúrio, é considerada a melhor solução ambiental. O forte argumento para isto é que tecnologias comprovadas e bem sucedidas já existem.

As principais empresas mundiais recicladoras de mercúrio estão localizadas, principalmente, nos EUA, enquanto que os fabricantes de equipamentos estão localizados na Suécia e Alemanha. Esse último país, foi o precursor na fabricação de equipamentos para a *desmercúriação* de lâmpadas fluorescentes, em meados da década de 80.

5.1 Situação nos EUA

Os EUA produzem cerca de 1 bilhão de lâmpadas fluorescentes por ano. Excetuando-se as exportações, a EPA estima que 756 milhões dão entrada no sistema de gerenciamento de resíduos. Considerando a população dos EUA de 260 milhões, o consumo per capita é de 2,9 lâmpadas.

A estimativa mais conservadora para a emissão anual de mercúrio a partir de lâmpadas fluorescentes é da ordem de 11,34 kg.ano⁻¹ em 1998, para um conteúdo médio da ordem de 15 mg de mercúrio/lâmpada.

No início da década de 90, a EPA, através de seu Programa *Green Lights*, incentivou a iniciativa privada a encontrar soluções para a problemática do descarte de lâmpadas. Já em 1995, a indústria de reciclagem era responsável por mais de 90% de todo o mercúrio consumido naquele ano. Atualmente existem mais de quarenta empresas recicladoras distribuídas por todo o território norte-americano. Dados apresentados pela EPA mostram que a opção de incineração de lâmpadas não foi uma experiência bem sucedida, pois os incineradores podiam emitir vapores de mercúrio. Em alguns casos, a pluma de contaminação foi transportada por mais de 320 km, aumentando ainda mais a área de influência de contaminação provocada pelas atividades do incinerador [11].

5.2 Situação no Canadá

No Canadá, mais de 140 toneladas de mercúrio são descartadas ao meio ambiente a cada ano, por todas as ativi-

dades envolvendo garimpos, queima de combustíveis fósseis, etc. Descargas incontroladas de substâncias tóxicas, resultantes particularmente do descarte de lâmpadas e certos tipos de pilhas são ameaças adicionais de contaminação do meio ambiente.

A indústria de reciclagem está resumida em poucas iniciativas isoladas. Mais de trinta e cinco tecnologias já foram inventariadas, entretanto poucas passaram à escala industrial. A maior indústria de reciclagem do Canadá trabalha com 500.000 lâmpadas fluorescentes/ano. Em seu processo de reciclagem, a poeira fosforosa é enviada aos USA para destilação do mercúrio contido [12].

5.3 Situação na Comunidade Européia

O movimento ecológico para a preservação do meio ambiente na Europa deu origem a uma política ambiental e a uma série de regulamentações (por exemplo, rotulagem ambiental - selo verde), o que encorajou as indústrias a montarem várias usinas de reciclagem.

Cerca de 600 milhões de lâmpadas fluorescentes são descartadas, anualmente, na União Européia.

Na Alemanha, a OSRAM foi a primeira fabricante de lâmpadas a desenvolver um sistema de reciclagem. A matéria-prima obtida das lâmpadas usadas é reutilizada na manufatura de novas lâmpadas (reciclagem de 93% do resíduo ao invés de 100% de descarte no lixo). Atualmente existem nove recicladoras de lâmpadas fluorescentes, com apoio da associação alemã de fabricantes de lâmpadas - *Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung* (AGLV) [13].

5.4 Situação no Brasil

O Brasil produz anualmente 48,5 milhões de lâmpadas contendo mercúrio, sendo 32 milhões de lâmpadas fluorescentes, 9 milhões de lâmpadas de descarga (mercúrio, mista, sódio e vapores metálicos) e 7,5 milhões de lâmpadas fluorescentes compactas, conforme dados fornecidos pela ABILUX [7]. Considere-

rando somente a produção interna e uma população brasileira da ordem de 170 milhões de habitantes, o consumo per capita brasileiro é de 0,3 lâmpadas, contra 2,9 dos EUA. O consumo total de mercúrio para a fabricação das lâmpadas nacionais é estimado, pela ABILUX, em 1.000 kg (conteúdo médio de 20,62 mg de Hg/lâmpada).

A estrutura de reciclagem de lâmpadas no Brasil é muito precária, pois existe somente uma indústria para tratar da descontaminação de lâmpadas fluorescentes. A empresa possui tecnologia própria e está localizada em Paulínea, a 170 km da cidade de São Paulo.

5.5 Processo de reciclagem de lâmpadas

O termo reciclagem de lâmpadas refere-se à recuperação de alguns materiais constituintes das lâmpadas e a sua reintrodução nas indústrias ou nas próprias fábricas de lâmpadas.

Existem vários sistemas de reciclagem em operação em diversos países da Europa, EUA, Japão e Brasil.

Um processo típico de reciclagem inclui desde um competente serviço de informação e esclarecimentos junto aos geradores de resíduos, explicitando como o mesmo deve ser transportado para que não ocorra a quebra dos bulbos durante o seu transporte, até a garantia final de que o mercúrio é removido dos componentes recicláveis e que os vapores de mercúrio são contidos durante o processo de reciclagem. Analisadores portáteis devem monitorar a concentração de vapor de mercúrio do ambiente para assegurar uma operação segura dentro dos limites de exposição ocupacional ($0,05 \text{ mg.m}^{-3}$, de acordo com a Occupational Safety and Health Administration – OSHA).

O processo de reciclagem mais usual e em operação em várias partes do mundo encontra-se apresentado na Figura 1 e envolve basicamente duas fases [14, 15] apresentadas a seguir.

a) Fase de esmagamento

As lâmpadas usadas são introduzi-

das em processadores especiais para esmagamento (cominuição), quando, então, os materiais constituintes são separados por peneiramento, separação eletrostática e cicloneagem, em 5 classes distintas:

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

No início do processo, as lâmpadas são implodidas e/ou quebradas em pequenos fragmentos, por meio de um processador (britador e/ou moinho). Isto permite separar a poeira de fósforo contendo mercúrio dos outros elementos constituintes. As partículas esmagadas restantes são, posteriormente, conduzidas a um ciclone por um sistema de exaustão, onde as partículas maiores, tais como vidro quebrado, terminais de alumínio e pinos de latão, são, então, separados e ejetados para fora do ciclone, onde, então, são separados por diferença gravimétrica e por separação eletrostática. A poeira fosforosa e particulados são coletados em um filtro no interior do ciclone. Posteriormente, por um mecanis-

mo de pulso reverso, a poeira é retirada desse filtro e transferida para uma unidade de destilação para recuperação do mercúrio (2ª fase do processo). O vidro, em pedaços de 15 mm, é, então, limpo, testado e enviado para reciclagem. A concentração média de mercúrio no vidro não deve exceder a $1,3 \text{ mg.kg}^{-1}$. O vidro nessa circunstância pode ser reciclado, por exemplo, na fabricação de produtos para aplicação não alimentar. O alumínio e pinos de latão, depois de limpos, podem ser enviados para reciclagem em uma fundição. A concentração média de mercúrio nesses materiais não deve exceder o limite de 20 mg.kg^{-1} . A poeira de fósforo é normalmente enviada a uma unidade de destilação (retorta), onde o mercúrio é extraído. O mercúrio é, então, recuperado e pode ser reutilizado. A poeira fosforosa resultante pode ser reciclada e reutilizada, por exemplo na indústria de tintas. O único componente da lâmpada que não é reciclado é o isolamento baquelítico existente nas extremidades da lâmpada.

No que se refere à tecnologia para a reciclagem de lâmpadas, uma de maior avanço tecnológico é apresentada pela empresa *Mercury Recovery Technology*

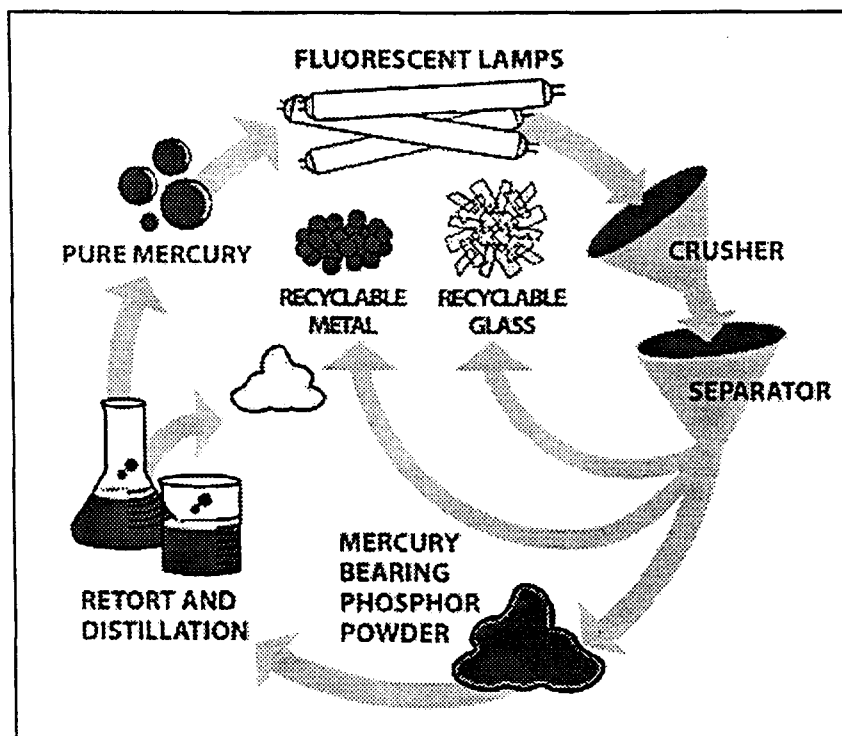


Figura 1 – Ciclo do processo de reciclagem [14].

– MRT, estabelecida em Karlskrona - Suécia. O processador da MRT trabalha a seco, em sistema fechado, incorporado em um "container" de 20 pés de comprimento (6,10 m). Todo o sistema opera sob pressão negativa (vácuo) para evitar a fuga de mercúrio para o ambiente externo (emissões fugitivas) [15].

b) Fase de destilação de mercúrio

A fase subsequente nesse processo de reciclagem é a recuperação do mercúrio contido na poeira de fósforo. A recuperação é obtida pelo processo de retortagem, onde o material é aquecido até a vaporização do mercúrio (temperaturas acima do ponto de ebulição do mercúrio - 357° C). O material vaporizado, a partir desse processo, é condensado e coletado em coletores especiais ou decantadores. O mercúrio assim obtido pode passar por nova destilação para se removerem impurezas. Emissões fugitivas durante esse processo podem ser evitadas usando-se um sistema de operação sob pressão negativa.

A MRT utiliza uma câmara de vácuo para o processo de destilação. Para se conseguir uma pureza de mercúrio da ordem de 99,99%, as partículas orgânicas carregadas pelos gases durante a vaporização do mercúrio são conduzidas a uma câmara de combustão onde, então, são oxidadas.

5.6 Custos para descontaminação de lâmpadas

O custo para a reciclagem e a consequente descontaminação do gerador de resíduos depende do volume, distância e serviços específicos escolhidos pelo cliente.

Nos EUA, o custo para pequenos geradores de lâmpadas usadas varia de USD\$1.08 a USD\$2.00/lâmpada. Para grandes geradores, o preço final é da ordem de USD\$0.36/lâmpada de 4 pés, mais custos com frete e acondicionamento para transporte. No Brasil, a empresa APLIQUIM Equipamentos e Produtos

Químicos Ltda. cobra pelos serviços de descontaminação valores de R\$0,60 a R\$0,70 por lâmpada, para posto na fábrica de Paulínea, São Paulo [16]. A esse preço, deve-se acrescentar os custos de frete (transporte), embalagem e seguro contra acidentes. O ônus envolvido no processo de reciclagem tem sido suportado, até o presente momento, pelas empresas/indústrias mais organizadas, que possuem um programa ambiental definido.

Os subprodutos resultantes do processo de reciclagem, tais como vidro, alumínio, pinos de latão e mercúrio, possuem baixo valor agregado: R\$20,00/tonelada para o vidro; R\$900,00/tonelada para o alumínio; R\$900,00/tonelada para o latão e R\$0,04 a R\$1,12/grama para o mercúrio, dependendo do seu grau de pureza.

5.7 Equipamentos disponíveis para reciclagem de lâmpadas

Os equipamentos para reciclagem de lâmpadas são comercializados pelas empresas: Dytec Environmental (Processador Dytec – Série 3.600), Advanced Environmental Recycling Company – AERC (Processador LSS1), Bethlehem Apparatus Company Inc (Recuperador/Destilador Quádruplo) dos EUA; Werc GmbH Berlim Wertstoff (Quebrador de lâmpadas HID – modelo DL150, Processador FL 4000) da Alemanha e Mercury Recovery Technology - MRT (Processador C/S, Quebrador de lâmpadas HID e Destilador Padrão) da Suécia.

Para se ter uma idéia, o preço do Processador C/S é da ordem de USD\$400.000 e o Destilador Padrão, USD\$350.000 (preços CIF – Rio de Janeiro).

6. Considerações finais

- O mercúrio contido em lâmpadas de mercúrio usadas e/ou quebradas não desaparecerá e poderá ser liberado ao meio ambiente, seja através das plantas de tratamento de efluentes e incineradores de resíduos sólidos,

seja através da água lixiviada de aterros sanitários/lixões, o que, certamente, provocará a contaminação de cursos d'água, solos e ecossistemas, com graves conseqüências para o meio ambiente e à saúde humana.

- É mister a busca de produtos que minimizem tal impacto e esforços devem ser envidados para prolongar a vida útil das lâmpadas.
- Faz-se necessário o esforço conjunto para envolver os fabricantes de lâmpadas e os grandes geradores desse tipo de resíduo na busca de soluções que possam minimizar o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado das lâmpadas.
- Em nível federal, não existe, no Brasil, uma legislação que regulamente o descarte de produtos que contenham mercúrio, especificamente, para as lâmpadas. Em nível estadual, já existem leis e projetos de lei contemplando a matéria, principalmente nos Estados da Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul.
- Uma legislação específica, em nível federal, deveria propor regras claras para o **manejo, transporte e disposição final** de lâmpadas de mercúrio. Para os grandes geradores de resíduos, essa legislação deveria regulamentar, por exemplo, que o descarte se fizesse através da reciclagem (modo mais correto). Para os pequenos geradores, como, por exemplo, do setor residencial, o destino do descarte poderia ser facultativo ao sistema de coleta seletiva de lixo urbano.
- Quanto à reciclagem, a atividade em si, somente tornar-se-ia auto-sustentável se os geradores deste tipo de resíduo perigoso/tóxico, incluindo aqui o produtor poluidor e o setor industrial/comercial, arcassem com o ônus da reciclagem, já que os subprodutos gerados possuem valores agregados muito baixos. Como negócio, a reciclagem de lâmpadas poderia ser alavancada pelo tratamento de produtos igualmente perigosos/tóxicos contendo mercúrio, tais como termostatos, termômetros, sobras de amálgamas odontológicas e pilhas/baterias.

Referências bibliográficas

- [1] NRIAGU, J. O. **Biogeochemistry of mercury in the environment**. Amsterdam: Elsevier Biomedical Press. 1979.
- [2] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) - **Waste reduction and proper waste management of products containing mercury**, Washington, DC: 1996. (EPA - OWR-96-30); (<http://www.owr.ehnr.state.nc.us>).
- [3] TRUESDALE et al. **Management of used fluorescent lamps: Preliminary risk assessment**. North Carolina - USA Research Triangle Institute, 1993. 60p. (Revised May 14, 1993).
- [4] BATTYE, W. et. al. **Evaluation of mercury emissions from fluorescent lamp crushing**. Washington, DC: 1994. (EPA-453/D-94-018).
- [5] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES (NEMA) - **The management of spent electrical lamps containing mercury**. 2. ed. New York, NY: NEMA, September 1994, 16p.
- [6] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) - **Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps - Final Report**. Washington, DC, Office of Solid Waste - EPA, 1997.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO (ABILUX) - **Fax ABILUX de 07 de outubro de 1998**, São Paulo, para Cláudio Raposo, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte. 1 p. Assunto: Produção brasileira de lâmpadas de mercúrio.
- [8] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Background information on mercury sources and regulations**. 1998/1999 (<http://www.epa.gov>)
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, R: ABNT, set/1987. (NBR 10.004).
- [10] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) - **Mercury usage and alternatives in the electrical and electronics industries**. Washington, DC, January/1994. 56p. EPA Document 5.600R94047.
- [11] ENVIROSENSE - **Factsheet: Disposal of spent fluorescent light tubes and mercury vapor lamps** ([http:// es.epa.gov/techinfo](http://es.epa.gov/techinfo)).
- [12] FLUORESCENT LAMP RECYCLERS INC.(FLR).- **The FLR Recycling Process**.Canada, FLR Home Page (<http://www.world.com/commercial>).
- [13] OSRAM - **A Recycling System for Fluorescent Lamps - Disposal, processing, re-use**. Alemanha, Document 199 S03 E 04/98 AD. OSRAM, 1998, 6p.
- [14] ECOLIGHTS NORTHWEST - **Fluorescent Lamp Recyclers**. ([Http://www.ecolights.com](http://www.ecolights.com))
- [15] MERCURY RECOVERY TECHNOLOGY (MRT) - **Catálogo de Equipamentos e Cotação de Preços**, Karlskrona, Sweden, 1998.
- [16] APLIQUIM Equipamentos e Produtos Químicos Ltda. - **Manejo e disposição de lâmpadas contendo mercúrio (INS)**. São Paulo: APLIQUIM, 1998.

Artigo recebido em 13/12/99.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO COM VISTAS AO CONTROLE AMBIENTAL

Cláudio RAPOSO; e-mail: raposoc@urano.cdtm.br;
 Walter de BRITO; e-mail: britow@urano.cdtm.br
 Maria Ângela B. C. MENEZES; e-mail: menezes@urano.cdtm.br
 Helena Eugênia L. PALMIERI; e-mail: help@urano.cdtm.br
 Lilian Viana LEONEL; e-mail: lvl@urano.cdtm.br
 Robson Cota de OLIVEIRA, e-mail: robcota@urano.cdtm.br

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN,
 Rua Prof. Mário Werneck, S/N, Cidade Universitária.
 30.123-970 Belo Horizonte – Minas Gerais.

RESUMO

As lâmpadas de mercúrio (fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio e multivapores) vêm sendo objeto da atenção dos ambientalistas, uma vez que as mesmas utilizam pequenas quantidades de mercúrio, componente essencial para o seu funcionamento. O objetivo principal deste trabalho é caracterizar os principais constituintes presentes em lâmpadas de mercúrio com vistas ao controle ambiental dos resíduos gerados, mormente na fase de disposição final (descarte). Para tal, foram utilizados métodos qualitativos e quantitativos de análise química. Os resultados obtidos mostram que os resíduos oriundos destas lâmpadas possuem significativas concentrações de mercúrio, chumbo e cádmio. Resíduos com esta característica, se descartados de forma inadequada, podem provocar efeitos deletérios à saúde humana e contaminar ecossistemas.

Palavras-chave: lâmpadas de mercúrio; poluição ambiental; resíduo sólido.

I. INTRODUÇÃO

Desde que a primeira fonte de luz artificial foi descoberta em 1879 por Thomas Alva Edison, contínuos esforços têm sido empregados para criar melhores e efetivas fontes de luz artificial.

Segundo trabalhos realizados pela Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (ABILUX) sobre conservação de energia, a iluminação consome 24% de toda a energia elétrica produzida em nosso país. A substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes é cada dia maior, o que vem acarretando uma importante redução no consumo de energia. No caso da substituição por fluorescentes compactas, esta redução pode alcançar até 80%, durabilidade de até 8 vezes mais e melhoria significativa no conforto e na iluminação [1].

Hoje, a iluminação eficiente e a melhoria contínua das fontes de luz artificial devem considerar como foco importante não só o custo de produção, mas também a proteção ao ambiente e ecossistemas.

No que concerne à proteção ambiental, a grande dificuldade constatada no Brasil é a carência de informações sobre as características químicas dos constituintes destas fontes de luz artificial, principalmente, no tocante às lâmpadas de mercúrio. Os fabricantes, quando consultados, alegam que tais informações fazem parte de sua estratégia de fabricação e, por isso, esquivam-se do assunto. Não obstante, a iniciativa deste trabalho é fazer uma radiografia e tentar trazer à tona importantes

detalhes sobre os principais constituintes utilizados em sua fabricação, notadamente, no que se refere aos metais pesados: chumbo, cádmio e mercúrio.

A proposta aqui apresentada vai também ao encontro da preocupação nacional sobre o gerenciamento de resíduos domésticos e industriais contendo metais pesados. No caso específico envolvendo lâmpadas de mercúrio, a legislação brasileira encontra-se em caráter embrionário. Urgem, portanto, ações que visem à regulamentação do gerenciamento destes resíduos no que tange ao seu gerenciamento (manuseio, transporte, estocagem e descarte final).

II. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é caracterizar quimicamente os principais constituintes existentes em lâmpadas de mercúrio, com vistas ao controle ambiental, mormente na fase de disposição final (descarte).

III. TIPOS DE LÂMPADAS MAIS UTILIZADOS SOB O PONTO DE VISTA COMERCIAL

Do ponto de vista comercial, a lâmpada fluorescente mais utilizada é a de 40 W (4 pés de comprimento = 1,22 m; diâmetros $\phi = 1.1/2''$ ou $1.1/4''$), embora outras menores e maiores e de diferentes formas

sejam também utilizadas. Este tipo de lâmpada possui temperatura de cor da ordem de 5.250 °K e índice de reprodução de cores de 72. No mercado brasileiro, existe a seguinte equivalência de cores: luz do dia especial (OSRAM), extra luz do dia (PHILIPS), super luz do dia (GENERAL ELECTRIC) e luz do dia plus (SYLVANIA) [2]. Com referência à lâmpada a vapor de mercúrio, a mais utilizada é a de 400 W de potência. A título de exemplo, o Manual da OSRAM do Brasil (um dos quatro principais fabricantes existentes no Brasil), apresenta os seguintes dados técnicos [2]:

◆ lâmpada fluorescente comum, tipo L40LDE, 40 W, fluxo luminoso de 2.700 lm e índice de Reprodução de Cores (IRC) de 72, vida útil de 7.500 horas;

◆ lâmpada de vapor de mercúrio, tipo HQL 400 W, fluxo luminoso de 22.000 lm, vida útil de 9.000 horas.

A vida útil de uma lâmpada é função da poeira emissora de elétrons que cobre os cátodos, a qual é consumida à medida que a lâmpada é acesa, ou seja, no ato de acender [3].

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de caracterização foi realizado em lâmpadas queimadas (já descartadas), com seleção dos seguintes tipos: (i) fluorescentes de 40 W e (ii) vapor de mercúrio de 400 W. Essa seleção levou em consideração os tipos de lâmpadas de mercúrio de maior consumo no mercado brasileiro e que, conseqüentemente, oferecem maior potencial de risco de contaminação ambiental. As lâmpadas selecionadas foram, inicialmente, limpas, implodidas e, em seguida, seus constituintes selecionados manualmente, com auxílio de pincel, pinça e alicate. As amostras para a determinação do mercúrio contido nos resíduos de lâmpadas foram reduzidas a uma granulometria aproximada de 200 mesh, objetivando facilitar a filtragem da lixívia e a abertura química. Durante a preparação das amostras procurou-se evitar a utilização de utensílios/aparatos que pudessem favorecer a formação de amálgamas de mercúrio, bem como de operações (peneiramento e britagem) que provocassem a perda de material fino das lâmpadas (pó de fósforo¹). A pulverização do resíduo na granulometria desejada foi conseguida manualmente.

Foram utilizados os seguintes métodos:

- métodos analíticos qualitativos e semi-quantitativos: difratometria de Raios X, espectrometria de

fluorescência de Raios X, espectrometria de energia de Raios X;

- métodos quantitativos: via úmida, espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES), absorção atômica com geração de vapor frio (AA-CV) e k_0 -ativação neutrônica paramétrica.

Os métodos utilizados no presente trabalho são métodos tradicionais de análise, com exceção da ativação neutrônica, que necessita de um equipamento especial (reator nuclear para irradiar as amostras de interesse). Por esta razão, apresentamos a seguir as condições operacionais desta técnica.

A técnica de k_0 -ativação neutrônica paramétrica foi aplicada na determinação de Hg e Sb em amostras de pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes (aliquota de 1 grama). É uma técnica "monostandard", no caso não-destrutiva, pela qual, em paralelo à amostra, é irradiado apenas um comparador/padrão para cálculo da atividade específica. É um método absoluto que utiliza a convenção de Högdahl, onde k_0 é uma constante natural dos isótopos em estudo (Hg-203 e Sb-124). Este método combina a simplicidade experimental dos métodos absolutos por ativação neutrônica com a exatidão dos métodos comparativos.

A equação (1), convenção de Högdahl, é a equação fundamental do método k_0 e é aplicada para se calcular a massa do i -ésimo elemento presente na amostra, em que os índices a e p referem-se, respectivamente, à amostra e ao padrão [5, 6].

$$m_a = \frac{m_p C_{n,a} \epsilon_p F_p S_p C_a D_a H_a}{k_0 C_{n,p} \epsilon_a F_a S_a C_p D_p H_p} \quad (1)$$

onde,

$$k_0 = \frac{M_p \theta_a P_{\gamma,a} \sigma_{0,a}}{M_a \theta_p P_{\gamma,p} \sigma_{0,p}} \quad (2)$$

Neste trabalho, as irradiações foram realizadas no reator TRIGA MARK I IPR-R1, localizado no CDTN. As demais análises químicas foram realizadas, na sua grande maioria, em laboratórios do CDTN/CNEN, em Belo Horizonte.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais constituintes existentes em lâmpadas de mercúrio foram agrupados em cinco classes:

❖ VIDRO

Os vidros existentes nas lâmpadas de mercúrio são de três tipos:

- ◆ vidro soda (alcalino) - bulbo de lâmpada fluorescente;
- ◆ vidro soda (alcalino), com chumbo - bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio, e
- ◆ vidro sílica - tubo interno (*pellet*) de lâmpada a vapor de mercúrio.

¹ Pó de fósforo - composto químico inorgânico, processado sob a forma de pó e depositado na superfície interna de lâmpadas fluorescentes e em determinados bulbos externos de lâmpadas de mercúrio e multivapores metálicos. A mistura química de diversos fósforos determina o índice de reprodução de cores (IRC), ou seja, as várias tonalidades de luz "branca". Nas lâmpadas, os fósforos são destinados a absorver as radiações ultravioletas de pequeno comprimento de onda (UV-C) e a transformá-las em luz visível [4].

Numa inspeção a olho nu, percebe-se que o vidro do bulbo externo de uma lâmpada a vapor de mercúrio apresenta coloração mais amarelada do que o vidro utilizado em lâmpada fluorescente. Esta cor mais intensa é indicativa de maior percentagem de Na_2O , conforme mostrado na TABELA 1. Estes vidros possuem diferentes composições químicas, pois são utilizados para diferentes especificidades de uso, daí a menção de **composição aproximada**.

O vidro sílica possui estrias, perceptíveis a olho nu, ao longo do tubo, o que facilita a sua identificação. Este vidro pode ser facilmente confundido com o vidro tipo "vycor" (substituto mais barato, porém com temperatura de fusão abaixo de 1.500°C). Testes de chama realizados no Laboratório de Hialotecnica do Colégio Técnico da UFMG mostraram que este tipo de vidro possui um brilho intenso, só atingindo o ponto de fusão em temperaturas superiores a 1700°C .

O vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio possui chumbo em sua composição, o que o diferencia dos demais vidros utilizados. O chumbo confere uma menor dilatação ao vidro, brilho mais intenso e um alto poder de refração da luz produzida. A difração de Raios X em amostras deste tipo de vidro, aquecidas a 1.100°C , durante 2 horas, mostrou as presenças de mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e cristobalita ($\alpha\text{-SiO}_2$). O constituinte principal é a sílica amorfa.

❖ **PÓ DE FÓSFORO**

(a) Em lâmpada fluorescente

Normalmente, uma lâmpada padrão de 40 W tem cerca de 5 a 6 gramas de pó de fósforo ($4,5 \text{ mg.cm}^{-2}$)². O pó de fósforo possui como fase cristalina predominante a fluorcloroapatita - $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl})$. Foram identificadas ainda outras fases minoritárias: CaCO_3 - calcita; CaHPO_4 - monetita, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - brushita, TiO_2 - rutilo e/ou anatásio e $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - whitlockita. A análise elementar aproximada desse pó encontra-se apresentada na TABELA 2. Os elementos Cu, Mn, Pb e Sb presentes funcionam como ions ativadores dos materiais fosforosos. Originalmente, o pó de fósforo é isento de mercúrio. Este metal é adicionado durante o processo de fabricação das diversas lâmpadas de mercúrio.

(b) Em lâmpada a vapor de mercúrio

Geralmente, a fina camada que recobre a parte interna de lâmpadas a vapor de mercúrio (peso aproximado de 0,5 grama/lâmpada de 400 W) é constituída de fosfato e vanadato de terras raras, cujas fases cristalinas predominantes são representadas pela xenotima (YPO_4) e wakefieldita (YVO_4). Na TABELA 2, apresenta-se a análise elementar aproximada desse pó de fósforo. O que chama a atenção neste material são as concentrações de ítrio e európio (constituíntes dos *red phosphors*), demais elementos do subgrupo do ítrio (Sm-Ho), vanádio e chumbo.

❖ **COMPONENTES DIVERSOS (MISCELÂNEA)**

(a) Terminais e Bases

Os terminais em lâmpadas fluorescentes são constituídos de uma liga de alumínio-magnésio, com ampla predominância do Al sobre o Mg, enquanto as bases de lâmpadas a vapor de mercúrio (soquete) são de bronze ou liga de ferro-níquel (difração de Raios X).

(b) Pinos de lâmpadas fluorescentes

São, predominantemente, de latão - liga de Cu e Zn.

(c) Material cimentante

O material cimentante encontrado nas bases de lâmpadas fluorescentes, nas cores vermelha e verde, apresenta como fases cristalinas: calcita - CaCO_3 , dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e quartzo - SiO_2 . A análise por fluorescência de Raios X mostrou a seguinte composição química (% em peso): CaO ($48,7 \pm 0,9$), MgO ($32,5 \pm 0,6$), SiO_2 ($12,6 \pm 0,3$) e PbO ($1,9 \pm 0,1$).

Em lâmpadas a vapor de mercúrio, o material cimentante é encontrado sob duas formas:

(i) material escuro, vitrificado e amorfo. Após a calcinação a uma temperatura de, aproximadamente, 900°C , este material continuou amorfo, isto é, sem formação de fase(s) cristalina(s). A composição química (% em peso) deste material escuro é: SiO_2 ($65,5 \pm 1,3$), Na_2O ($13,4 \pm 0,3$), CaO ($7,5 \pm 0,2$), Al_2O_3 ($2,2 \pm 0,1$), K_2O ($0,83 \pm 0,04$) e MgO ($0,35 \pm 0,02$).

ii) material claro: quartzo (predominante) e mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). A composição química (% em peso) é a seguinte: SiO_2 ($78,1 \pm 1,5$), Al_2O_3 ($14,2 \pm 0,3$), K_2O ($2,32 \pm 0,11$) Na_2O ($0,32 \pm 0,02$), e MgO ($0,13 \pm 0,01$).

(d) Material isolante

O material isolante em lâmpada fluorescente é de constituição baquelítica (resina sintética, obtida pela condensação de fenóis com aldeído fórmico).

(e) Filamentos

Os filamentos de lâmpadas fluorescentes são constituídos de platina, tungstênio, ósmio e tântalo. O filamento identificado neste trabalho é à base de tungstênio elementar (W).

(f) Poeiras emissoras de elétrons

Normalmente, são óxidos alcalinos terrosos, apresentando as seguintes estequiometrias: tungstato de bário e cálcio - Ba_2CaWO_6 , carbonato de bário - BaCO_3 , denominado de witherita e $\text{Ba}_5\text{CaW}_2\text{O}_{12}$.

(g) Eletrodos

Geralmente são de tungstênio, níquel, cobre e/ou ferro. Os mais utilizados em lâmpadas a vapor de mercúrio são de tungstênio (W) e de ferro cromado - $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$ (aço inox), enquanto que em lâmpadas fluorescentes é o de ferro cromado.

(h) Suporte interno e fio condutor

Geralmente estes suportes internos em lâmpadas a vapor de mercúrio são de ferro niquelado ou aço inox. O fio condutor de energia é de óxido de cobre - Cu_2O (cuprita).

(i) Resistor de partida

Os resistores encontrados em lâmpadas a vapor de mercúrio de 400 W de potência são de cobre e possuem resistência variando de 18 a $20 \text{ k}\Omega$. Tais resistores são

² Informação verbal fornecida pela OSRAM do Brasil

TABELA 1 – Composição aproximada de vidros utilizados em lâmpadas de mercúrio

Tipo de Lâmpada	Composição aproximada (% em peso)								Tipo de Vidro
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	PbO	
Fluorescente	69,2 ± 1,4	3,1 ± 0,2	1,8 ± 0,1	16,5 ± 0,5	4,2 ± 0,2	1,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1	<0,1	Vidro Soda
Vapor de Hg – tubo externo	70,1 ± 1,4	8,8 ± 0,3	0,7 ± 0,1	12,4 ± 0,4	<0,1	<0,1	1,3 ± 0,1	4,8 ± 0,2	Vidro Soda
Vapor de Hg – tubo interno	96,8 ± 1,9	ND	ND	1,4 ± 0,1	ND	ND	0,7 ± 0,1	ND	Vidro Sílica

Métodos utilizados: Gravimetria (SiO₂); Absorção Atômica (demais óxidos); ICP-AES (PbO); ND – Não detectado

utilizados para limitar a corrente que flui para o eletrodo de partida.

(j) Soldas

Normalmente, as soldas existentes em bases de lâmpadas a vapor de mercúrio são de chumbo. A difração de Raios X apontou ainda a presença de AgF.

❖ MERCÚRIO

O conteúdo total de mercúrio em uma lâmpada depende, basicamente, do tipo de lâmpada, modelo, dimensões, ano de sua fabricação e do fabricante. Informações de fabricantes de lâmpadas dos EUA indicam que substanciais reduções no conteúdo de mercúrio foram conseguidas a partir da década de 90 e que maiores reduções podem ser esperadas nas próximas décadas [7].

(a) Mercúrio em lâmpadas fluorescentes

A previsão para o período de 1997 – 2007 é de que o conteúdo de mercúrio em uma lâmpada fluorescente de 40 W, diâmetro de 1,5" (identificada como T12) seja de 21 mg [7]. Informações apresentadas pela National Electrical Manufacturers Association (NEMA) em conjunção com a Sylvania (fabricante de lâmpadas), indicam que, provavelmente, 0,2% (0,042 mg) do conteúdo total de mercúrio esteja sob a forma de mercúrio elementar (vapor ou líquido) e o restante de 99,8% (20,958 mg) sob a forma de mercúrio divalente, TABELA 3 [8]. Entretanto, a especiação do mercúrio no pó de fósforo (matriz sólida) é, ainda, um assunto controverso e complexo [9].

(b) Mercúrio em lâmpadas a vapor de mercúrio

O mercúrio neste tipo de lâmpada está concentrado na sua parte interna, mais precisamente, no tubo interno (*pellets*). O mercúrio encontra-se sob a forma líquida (mercúrio elementar) e o seu conteúdo varia de 16 mg em uma lâmpada de 75 W a 185 mgr em uma lâmpada de 1000 W; o conteúdo aumenta com a potência da lâmpada. Em lâmpadas a vapor de sódio, o mercúrio está sob a forma de amálgama Hg-Na, e o conteúdo varia de 16 mg de mercúrio para uma lâmpada de 50 W a 31 mg para uma lâmpada de 1000 W [10].

(c) Análises realizadas

As análises de mercúrio aqui reportadas foram realizadas em resíduos de lâmpadas fluorescentes fabricadas no Brasil, 40 W de potência e tipo – luz do dia. As lâmpadas a vapor de mercúrio não foram objeto de análises neste trabalho devido às dificuldades encontradas na amostragem. Além de não existir um procedimento específico de amostragem, o mercúrio existente nestas lâmpadas está confinado nos pellets de vidro sílica, difíceis

de serem quebrados, sem que haja perda de massa deste metal. Assim sendo, as análises ficaram restritas à determinação do mercúrio no pó de fósforo, no resíduo bruto e na lixívia do resíduo de lâmpadas fluorescentes.

Adicionalmente, foram feitas análises intercomparativas utilizando laboratórios e métodos analíticos diferentes.

c1) Análises de mercúrio em pó de fósforo de lâmpada fluorescente

Na TABELA 4, encontram-se apresentados os resultados da concentração de Hg em pó de fósforo (matriz sólida). A amostra LF 01 foi analisada em dois laboratórios (CDTN e LIMNOS), utilizando-se a mesma técnica analítica (absorção atômica por geração de vapor frio), o que permitiu uma intercomparação de resultados. Além disso, a mesma amostra foi analisada por k_0 -ativação neutrônica paramétrica, o que também propiciou a intercomparação de diferentes técnicas analíticas. O valor médio de 4210 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Hg para a amostra LF 01 é da mesma ordem de grandeza ao valor de 4700 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ apresentado para o mercúrio em uma análise de pó de fósforo de uma lâmpada dos EUA [6]. Quanto a intercomparação de laboratórios, a diferença entre uma análise e outra é menor do que 10%; comparando-se técnicas analíticas diferentes, os resultados obtidos mostram uma coerência e uma aproximação de valores muito boas. Os valores de concentração de Hg obtidos para as amostras LF 02 e LF 03 são bem diferentes dos da amostra LF 01, apesar de as amostras serem procedentes do mesmo tipo de lâmpada fluorescente e do mesmo fabricante. Isto mostra a variabilidade que ocorre na concentração de mercúrio em um mesmo tipo de lâmpada. Outro fator que merece destaque é a representatividade da amostra, pois o mercúrio pode ficar concentrado em partes preferenciais dentro do tubo de vidro como, por exemplo, nas extremidades, o que altera, significativamente, os resultados.

c2) Análise de mercúrio em resíduo de lâmpada fluorescente (mistura de vidro + pó de fósforo)

Na TABELA 5, encontram-se apresentados os resultados de mercúrio total em resíduos de lâmpadas (mistura de vidro + pó de fósforo). Neste caso, o mercúrio contido em cada lâmpada está diluído na massa bruta, isto é, vidro + pó de fósforo. Comparando-se os resultados apresentados nas TABELAS 4 e 5, verifica-se que existe uma certa coerência entre as concentrações no pó de fósforo e na massa bruta. Para as amostras LF 02 e LF 03,

TABELA 2 – Análise elementar aproximada de pó de fósforo utilizado em lâmpadas de mercúrio

Elemento	Pó de fósforo	
	Lâmpada fluorescente - 40 W	Lâmpada a vapor de mercúrio - 400 W
	Concentração em % em peso ou $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	
Ca	$(37,91 \pm 0,11) \%$	$(900 \pm 45) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
P	$(18,12 \pm 0,36) \%$	$(6,1 \pm 0,2) \%$
F	$(2,95 \pm 0,14) \%$	$(1,5 \pm 0,1) \%$
Mn	$(0,86 \pm 0,02) \%$	$(20 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Cl	$(0,72 \pm 0,04) \%$	ND
Sb	$(0,61 \pm 0,01) \%$	$(200 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Cd	$(0,18 \pm 0,01) \%$	$(11 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Al	$(580 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(1,48 \pm 0,12) \%$
Ba	$(310 \pm 15) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(28 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Mg	$(143 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(165 \pm 5) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Sr	$(125 \pm 7) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(19,2 \pm 0,9) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ni	$(90 \pm 4) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(335 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Pb	$(38 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(0,60 \pm 0,03) \%$
Cr	$(10 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(65 \pm 5) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Zn	$(7 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(32 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Co	$(4 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(6 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
La	$(35 \pm 4) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(38 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Nd	$(31 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(10 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ce	$(12 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(27 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Sm	$(6 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(180 \pm 9) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Dy	$(3,0 \pm 0,3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(25 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Er	$(3,0 \pm 0,3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(54 \pm 2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Ho	$(2,0 \pm 0,2) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(15 \pm 1) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Eu	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(2,78 \pm 0,04) \%$
Y	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(34,3 \pm 0,3) \%$
Yb	$< 1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$(200 \pm 10) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
V	NA	$(1,66 \pm 0,10) \%$

Observações: ND - Não detectado; NA - Não analisado

Métodos de análise: Colorimetria (P); Potenciometria (F e Cl); Espectrometria de Fluorescência de Raios X (V); ICP/AES (demais elementos)

TABELA 3 – Conteúdo de mercúrio em lâmpadas fluorescentes de 40 W (T12)

Ano	Mercúrio (mg/lâmpada)		
	Elementar	Divalente	Total
Anterior a 1992	0,082	40,918	41
1992 - 1996	0,06	29,94	30
1997 - 2007	0,042	20,958	21

Fonte: Referência [8].

TABELA 4 – Mercúrio em pó de fósforo de lâmpada fluorescente de 40 W

Data	Amostra	Matriz	Técnica Analítica	Concentração $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Laboratório
30/03/1999	LF 01	sólida	Absorção Atômica ³	(4131 ± 20)	LIMNOS ⁴
03/04/2000	LF 01	sólida	Absorção Atômica	(4400 ± 100)	CDTN
12/04/2000	LF 01	sólida	Ativação Neutrônica	(4100 ± 70)	CDTN
12/04/2000	LF 02	sólida	Ativação Neutrônica	(1010 ± 40)	CDTN
03/04/2000	LF 03	sólida	Absorção Atômica	(2480 ± 70)	CDTN

TABELA 5 – Concentração de mercúrio em massa bruta de resíduos de lâmpadas fluorescentes de 40 W

Data	Amostra	Matriz	Técnica Analítica	Concentração $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Laboratório
03/04/2000	LF 01	sólida	Absorção Atômica	(64 ± 3)	CDTN
10/05/2000	LF 02	sólida	Ativação Neutrônica	(6 ± 1)	CDTN
10/05/2000	LF 03	sólida	Ativação Neutrônica	(15 ± 1)	CDTN

o fator de diluição é, praticamente, o mesmo (168 vezes); já para a amostra LF 01, este fator é da ordem de 66 vezes, o que evidencia, mais uma vez, a variabilidade existente.

❖ METAIS PESADOS

Com base nas análises realizadas, a atenção foi direcionada aos seguintes metais pesados:

- cádmio – existente no pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes;
- chumbo – existente em soldas e no vidro do bulbo externo de lâmpadas a vapor de mercúrio

O cádmio foi dosado por dois métodos analíticos diferentes, ambos apresentando uma excelente aproximação de valores de concentração: duas amostras por espectrometria de Raios X ($0,18 \pm 0,01\%$ e $0,19 \pm 0,01\%$) e duas amostras por espectrometria de energia de Raios X ($0,14 \pm 0,01\%$ e $0,22 \pm 0,01\%$).

O chumbo, presente no vidro do bulbo externo, apresenta uma concentração da ordem de ($4,8 \pm 0,1\%$), em análise por ICP-AES.

VI. CONCLUSÕES

1. Em que pesem, de um lado, a carência de informações a respeito da natureza dos principais constituintes e da concentração de metais pesados presentes em lâmpadas de mercúrio e, de outro lado, a grande diversidade de formas, tamanhos e tipos de lâmpadas, foi possível neste trabalho levantar importantes particularidades sobre estes produtos.

2. No que concerne às técnicas analíticas empregadas, a ativação neutrônica revelou ser uma importante técnica que pode ser também utilizada na determinação de mercúrio total, principalmente em amostras com altas concentrações deste metal. Em se tratando de análises de mercúrio em massa bruta de resíduos, isto é bastante positivo, pois pode minimizar os erros inerentes às fases de preparação e abertura química de amostras, procedimentos estes requeridos por outras técnicas analíticas. Além do mais, poderá constituir-se em uma técnica alternativa a ser empregada na aferição de resultados como, por exemplo, a absorção atômica de vapor frio por injeção em fluxo (AA-CV), que é a técnica mais indicada para a determinação de mercúrio nestes tipos de matrizes.

3. A respeito da caracterização dos principais constituintes, ficou constatada a diferenciação dos pós de fósforo utilizados em lâmpadas fluorescentes e lâmpadas a vapor de mercúrio: o primeiro, um fosfato de cálcio, mais precisamente uma fluorcloroapatita, com Mn, Cd, Sb e, o segundo, um fosfato de ítrio - xenotima, com concentrações importantes de Y e Eu (*red phosphors*), demais elementos do subgrupo do ítrio (Sm-Ho), V e Pb.

4. Dentre todos os constituintes caracterizados, a atenção deve ser direcionada: (1) vidro do bulbo externo das lâmpadas de descarga, (2) *pellet* de vidro sílica de lâmpada a vapor de mercúrio e (3) pó de fósforo (fosfato de cálcio) de lâmpadas fluorescentes. O vidro do bulbo de lâmpadas (aproximadamente 70% em peso) contém chumbo em concentrações significativas, superando o limite regulatório estabelecido pela legislação brasileira.

³ SM - 3500-Hg Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Pollution and Health Association - APHA, 1995)

⁴ LIMNOS Hidrobiologia e Limnologia Ltda. - Laboratório de análises, em Belo Horizonte - Minas Gerais.

O pó de fosfato de cálcio, bem como o *pellet* de vidro sílica contém mercúrio em concentrações apreciáveis, conforme análises aqui apresentadas e dados extraídos da literatura norte-americana. Embora as análises químicas efetuadas no presente trabalho sejam em número limitado, existe uma grande possibilidade de que os resíduos de lâmpadas de mercúrio venham a apresentar a característica de periculosidade para o mercúrio, até porque o limite regulatório brasileiro ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$) é bem mais conservativo que o limite norte-americano ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$).

5. Os resíduos gerados por estes produtos devem ser caracterizados em termos de periculosidade, de acordo com a legislação brasileira. A atenção deve ser direcionada para o gerenciamento destes resíduos (manuseio, transporte, armazenamento e descarte final), evitando-se, com isso, efeitos deletérios à saúde humana e contaminação de ecossistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DINHEIRO VIVO Agência de Informações S/A. <http://www.advivo.com.br/energia/energia3>.
- [2] OSRAM DO BRASIL. **Produtos para iluminação geral** São Paulo: 1996. 14p.
- [3] TRUESDALE, R.; BEAULIEU, S. M.; PIERSON, T. K. **Management of used fluorescent lamps**: preliminary risk assessment. Final Report. Washington, U. S. EPA. 1993. 60p.
- [4] GE Lighting North America. **Glossary Terms**. <http://www.gelighting.com/na/institute/glossary.html>
- [5] DE CORTE, F. **The k_0 -standardization method**: a move to the optimization of neutronactivation analysis. Ryksuniversiteit Gent, Faculteit Van de Wetenschappen, 1986. 464p.
- [6] MARETTI JÚNIOR, F. **Roteiro para irradiações no Reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1980. Nota Técnica LABRE/DEAT- 004/80. NUCLEBRAS.
- [7] U. S. EPA. Office of Solid Waste. **Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps**. Final Report. Washington: 1997. 1 v.
- [8] U. S. EPA. Office of Solid Waste. **Response to comments document**. Final rule for hazardous waste lamps. 83p. <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/id/>
- [9] U. S. EPA. Office of Solid Waste. **Notice of data availability for the study on mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps**. comment response document. Washington: 1998. p56-57.
- [10] NATIONAL ELECTRIC MANUFACTURERS ASSOCIATION. **The management of spent electric lamps containing mercury**. 2. ed. Washington: NEMA, 1994. 14p.

ABSTRACT

Mercury lamps (fluorescent, mercury vapor, sodium vapor and multi-vapors) have been focus of attention for environmentalists, once they carry small quantities of mercury – essential component for their functioning. The central objective of this paper is to characterize the main components present in mercury lamps aiming environmental control of generated waste, mainly at the final disposal stage. Quality and quantity methods of chemical analysis have been used, including the k_0 -standardization method. The obtained outcome show that these lamps waste have high mercury, lead and cadmium concentration. This type of solid waste, if disposed inadequately, may provoke harmful effects to human health and contaminate ecosystems.

Keywords: mercury lamps; environmental pollution; solid waste.

NECESSIDADE DE UMA LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA PARA O GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DE LÂMPADAS DE MERCÚRIO

Cláudio Raposo

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN Belo Horizonte

e-mail: raposoc@urano.cdtb.br

A contaminação ambiental causada pelo descarte inadequado de produtos que contêm mercúrio é, hoje, uma preocupação mundial, haja vista os efeitos deletérios que este metal pode causar à saúde humana e aos ecossistemas. Dentre esses produtos, as lâmpadas de mercúrio (fluorescentes e de vapor), ao fim de sua vida útil, apresentam riscos potenciais, uma vez que geram resíduos perigosos, os quais requerem tratamento específico. O autor comprovou, em recente trabalho, que os resíduos gerados por tais lâmpadas apresentam concentrações elevadas de Hg e Pb, em diversos casos, excedendo aos padrões estabelecidos pela norma brasileira de resíduos sólidos - ABNT NBR 10.004. Do ponto de vista ambiental isso é grave e preocupante: primeiro, pelo contingente de lâmpadas de mercúrio fabricado anualmente, que é da ordem de 48,5 milhões de unidades (97% são descartadas diretamente no lixo e apenas 3% tratadas por processo de reciclagem) e, segundo, porque os produtos similares importados não estão sendo objeto de controle quanto aos níveis de metais pesados. No caso específico do mercúrio, o limite brasileiro, em testes de lixiviação de resíduos (100 ppb) é muito conservativo e corresponde à metade do norte americano (200 ppb), o que deixa dúvidas quanto à adequação destes similares ao cumprimento da Norma. No Brasil, a legislação que norteia o descarte e destinação final de lâmpadas está restrita, no nível de projeto de lei, aos estados da Bahia, Minas Gerais e Rio Grande do Sul e por lei municipal da cidade de São Paulo. Urge, portanto, a necessidade de uma legislação federal específica para gerenciar tais resíduos no que tange ao seu manuseio, coleta, armazenamento, transporte e tratamento/destinação final. Para o controle do descarte, as opções com o ônus por conta do fabricante (distribuição reversa) e/ou por conta do gerador poluidor, devem ser analisadas e ponderadas, em virtude das características e fragilidade desses produtos. Propõe-se ao Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA que seja elaborada uma resolução para tratar da fabricação e importação desses tipos de lâmpada a fim de atender aos limites da aludida Norma, sem que haja majoração de preços, perda de qualidade e redução de vida útil dos produtos.
