

**PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**ENE - 703 - USOS FINAIS E DEMANDA DE ENERGIA**

**Prof. Ildo Sauer**

**Trabalho Final**

**Aplicação do enfoque *Natural Step* ao mercúrio de lâmpadas  
fluorescentes**

**Oswaldo Lucon**  
*dezembro 1999*

## Índice

<b>Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>Objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>Iluminação e o <i>Natural Step</i>: incorporando externalidades ambientais.....</b>	<b>3</b>
<b>Escopo de análise .....</b>	<b>6</b>
<b>Merúrio como contaminante.....</b>	<b>7</b>
<b>Merúrio em produtos.....</b>	<b>7</b>
<b>Merúrio em lâmpadas fluorescentes.....</b>	<b>8</b>
<b>O mercúrio das lâmpadas no ambiente: aspectos normativos.....</b>	<b>9</b>
<b>Situação do mercúrio no Brasil .....</b>	<b>10</b>
<b>Alternativas para a remoção de mercúrio de águas e solos.....</b>	<b>11</b>
<b>Reciclagem de lâmpadas fluorescentes .....</b>	<b>11</b>
<i>Quantidades envolvidas em reciclagem.....</i>	<i>12</i>
<i>Dificuldades na reciclagem .....</i>	<i>12</i>
<b>Aspectos Financeiros Associados à Reciclagem .....</b>	<b>13</b>
<b>Resultados do Balanço Ambiental.....</b>	<b>14</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>16</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>16</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>18</b>
<i>Alternativas de substituição de lâmpadas.....</i>	<i>18</i>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>19</b>
<i>Características técnicas de uma planta compacta de recuperação de mercúrio de lâmpadas, custos de capital da instalação e subsídios a cálculo de ponto de equilíbrio econômico-financeiro .....</i>	<i>19</i>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>20</b>
<i>Preços de reciclagem e transporte para lâmpadas praticados no Brasil.....</i>	<i>20</i>
<b>ANEXO IV .....</b>	<b>21</b>
<i>Aplicações práticas do Natural Step.....</i>	<i>21</i>

# Aplicação do enfoque *Natural Step* ao mercúrio de lâmpadas fluorescentes

Oswaldo Lucon

## Introdução

Recentemente as questões ambientais passaram a ser consideradas de locais para globais, de poucas e grandes fontes de poluição para fontes difusas, de efeitos imediatos para efeitos a longo prazo e de baixa para alta complexidade. Aspectos de análise de ciclo de vida de produtos, prevenção à poluição e sustentabilidade tendem cada vez mais a ser incorporados em instrumentos normativos e legais e considerados na concepção e avaliação de produtos e serviços. O presente trabalho buscou concentrar-se em lâmpadas fluorescentes, especificamente no aspecto emissões de mercúrio. Tais produtos comprovadamente substituem eficientemente em termos energéticos lâmpadas convencionais incandescentes; entretanto, seu tratamento inadequado no pós-uso aumenta sistematicamente a concentração de mercúrio e seus compostos na natureza. O enfoque *Natural Step*, baseado em quatro regras básicas de sustentabilidade, visa mitigar os efeitos adversos desta opção, maximizando seus benefícios ambientais. Barreiras à aplicação destas regras são neste trabalho avaliadas.

## Objetivo

Seguindo-se a metodologia proposta pelo *Natural Step*, buscar-se-á verificar a magnitude dos impactos ambientais decorrentes da utilização de lâmpadas fluorescentes e avaliar fatores que dificultam a recuperação do mercúrio destes produtos. Para tal, serão relacionados aspectos de ciclo de vida dessas lâmpadas, avaliada a relevância das emissões de mercúrio por tais produtos e identificadas barreiras à reciclagem como alternativa de pós-uso ambientalmente mais adequada. Um balanço econômico-ambiental sucinto deverá fornecer parâmetros de comparação da opção de uso de lâmpadas fluorescentes com recuperação de mercúrio em relação ao uso destas sem operações de reciclagem e com o uso de lâmpadas incandescentes convencionais, que consomem mais energia mas não contêm mercúrio. Longe de esgotar o assunto, o presente trabalho visa subsidiar discussões mais aprofundadas sobre o tema.

## Iluminação e o *Natural Step*: incorporando externalidades ambientais

A filosofia do *Natural Step* foi concebida em 1989 na Suécia, por um grupo de 50 cientistas, encabeçado por um oncologista, Dr. Karl-Henrik Robèrt, um estudioso da conexão entre doenças e toxinas. O grupo, na época, redigiu um documento em consenso que descreve o conhecimento básico das funções da biosfera, como a sociedade influencia sistemas naturais da qual faz parte, como os seres humanos estão se ameaçando deteriorando funções naturais e - finalizando - descrevendo possibilidades de se mudarem estas tendências de forma sustentável. Após várias interações, o documento foi enviado a cada residência ou escola na Suécia. No início da década de 1990, Dr. Robèrt trabalhou com o físico sueco John Holmberg para definir um sistema de condições definidas de sustentabilidade baseada nas leis da termodinâmica e dos ciclos naturais. Unindo-se as idéias do documento de consenso com as quatro condições então definidas formou-se a estrutura do *Natural Step* (Etapa Natural). Após o reconhecimento do Rei da Suécia, o *Natural Step* recebeu apoio de empresas e líderes políticos, muitos dos quais resolveram participar das reuniões subsequentes concebidas para sua divulgação. Reconhecendo o valor de se alterarem comportamentos para refletir a compreensão de processos cíclicos ao invés de lineares, companhias de grande porte iniciaram o processo de incorporação das condições de sistema em suas práticas empresariais.

A estrutura do *Natural Step* auxilia indivíduos e organizações a focar questões-chaves ambientais através de uma perspectiva sistêmica, a reduzir o uso de recursos naturais, a desenvolver novas tecnologias e facilitar a comunicação da empresa. Fornece uma linguagem comum e princípios para auxiliar na mudança de práticas existentes e diminuir seu impacto no meio ambiente. As condições de sistema tem sido usadas como um modelo mental compartilhado para a solução de problemas, para a produção de documentos de consenso (como práticas sustentáveis relativas à produção e reutilização de metais, energia, agricultura e florestas), para estruturar trabalhos científicos em universidades, como currículo para estudantes e para corporações, municipalidades e outras organizações como um instrumento de planejamento estratégico para a sustentabilidade.

Atualmente na Suécia, *Natural Step* é um trabalho doméstico e tem transformado a forma que indivíduos, escolas, comunidades e empresas pensam sobre sustentabilidade. Mais de 70 municipalidades adotaram a estrutura e 60 empresas - tais como IKEA, Electrolux, McDonalds, Scandic Hotels e OK Petroleum estão utilizando ativamente o *Natural Step*<sup>1</sup>. A organização não-governamental "The *Natural Step*" (TNS) tem escritórios na Suécia, Reino Unido, Canadá, Japão, Austrália e Estados Unidos.

O *Natural Step*, como mencionado, opera basicamente segundo 4 regras básicas, funcionalmente distintas, todas necessárias, que abrangem todos os aspectos ambientais em todas as escalas e descrevem os problemas junto à fonte.

As 4 condições de sistema para o *Natural Step* são as seguintes:

- 1) **A quantidades de substâncias da crosta terrestre não devem aumentar sistematicamente na natureza.** Esforços devem ser feitos para fazer com que a extração de combustíveis fósseis - como o gás natural - ou minérios - como o mercúrio - da crosta terrestre não se dê a uma velocidade maior do que estes são reincorporados. É necessário reduzir o uso de recursos e aumentar a reciclagem.
- 2) **As concentrações de substâncias produzidas pela sociedade não devem sistematicamente aumentar na natureza.** Substâncias não devem ser produzidas a uma velocidade superior à que são degradadas. Devem ser banidas substâncias recalcitrantes (persistentes no ambiente).
- 3) **A base física da produtividade e diversidade da natureza não deve ser sistematicamente deteriorada (diminuída).** Recursos não devem ser usados além da habilidade do desenvolvimento sustentado.
- 4) **Devemos ser suficientemente eficientes para atender às necessidades humanas básicas de maneira global.** A sociedade deve ser capaz de obter suas necessidades - não seus desejos - distribuindo equalitativa e globalmente os recursos naturais. Eficiência no uso de energia está intimamente ligada a esta regra.

A Primeira Lei da Termodinâmica é importante para se entender o planeta como um sistema. Toda a massa e energia no universo se conserva; a energia deve ser convertida em diferente formas, mas a quantidade total de energia num sistema isolado permanece constante. Ou, simplesmente: nada desaparece.

Energia e matéria tendem a se espalhar espontaneamente, em tudo há uma tendência à dispersão. Isto pode ser entendido através da Segunda Lei da Termodinâmica, ou Lei da Entropia. Ou, simplesmente: tudo se espalha.

---

<sup>1</sup> Vide Anexo IV

A qualidade dos materiais está na estrutura e na concentração da matéria. Alimentos e gasolina são valiosos porque contêm ordem. Não podemos consumir energia ou matéria, apenas sua concentração, pureza ou estrutura. Ou, simplesmente: há valor na ordem.

Acréscimos líquidos na qualidade material na Terra são gerados quase que em sua totalidade por processos fotossintéticos induzidos pela luz solar. Ou, simplesmente: plantas criam estrutura e ordem utilizando energia solar.

O *Natural Step* funciona como uma filosofia geral, cobrindo todo um sistema: simples, princípios gerais que instruem a prevenção junto à fonte, tornando os problemas mais fáceis de solucionar (*upstream*) ou lidando com as consequências, impactos, numa forma complexa, que envolve a análise de ciclo de vida de produtos e serviços (*downstream*).

Iluminação é um dos mais importantes serviços energéticos. Obtém-se artificialmente a partir da queima de determinados materiais (lenha, gordura animal, derivados de petróleo), do aquecimento de metais (filamento de tungstênio em lâmpadas incandescentes, por eletricidade) ou da ionização de partículas (vapor de mercúrio em lâmpadas fluorescentes). Tais atividades requerem o consumo de recursos naturais, renováveis ou não e, inevitavelmente, geram algum tipo de resíduo durante seu ciclo de vida. Para se propiciar um serviço energético de iluminação é necessária, via de regra, eletricidade. A produção, transmissão e distribuição desta, por sua vez, demanda investimentos de capital e de operação e caracteriza-se por uma ampla gama de impactos ambientais.

Lâmpadas incandescentes são amplamente utilizadas, principalmente no setor residencial. Sua baixa eficiência reflete em grandes perdas de eletricidade convertida em calor. Por outro lado, o mercúrio contido nas lâmpadas fluorescentes dispostas em lixões e aterros sanitários convencionais pode contaminar solo, águas superficiais e subterrâneas. Emissões fugitivas deste metal em estado de vapor também são um sério contaminante, especialmente em termos de saúde ocupacional.

A Tabela 1 a seguir enumera algumas das principais adversidades ambientais das duas opções (dada uma mesma unidade de serviço energético)

**Tabela 1**

<b>Impacto ambiental</b>	<b>Incandescentes</b>	<b>Fluorescentes (Hg)</b>
Impactos decorrentes da geração de eletricidade: ✓ Consumo de combustíveis não renováveis (caso de termelétricas) ✓ Emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , particulados, CO <sub>2</sub> de termelétricas ou CH <sub>4</sub> de hidrelétricas) ✓ Perdas de biodiversidade, paisagísticas, arqueológicas (decorrentes da construção de grandes barragens hidrelétricas) ✓ Perdas de biodiversidade, eutrofização, poluição por pesticidas, emissões atmosféricas, acidificação (no caso de energia de biomassa) ✓ Emissão de mercúrio (presente principalmente em combustíveis como carvão e óleo)	Maior	Menor
✓ Contaminação e bioacumulação por mercúrio e seus compostos, quando da disposição final das lâmpadas ou por emissões fugitivas na fabricação, manuseio, transporte e operações de reciclagem	Não	Sim

### Escopo de análise

O presente trabalho se propõe a avaliar aspectos da viabilidade de adoção de uma forma mais ambientalmente sustentável de substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes. Os principais impactos a serem avaliados serão:

- ✓ a liberação de mercúrio no ambiente (no qual este estudo se concentrará)
- ✓ poluentes locais e gases de efeito estufa de usina termelétrica a gás natural e
- ✓ área alagada por usina hidrelétrica.

Demais impactos de ciclo de vida do produto, além dos decorrentes de emissões de mercúrio por lâmpadas fluorescentes lançadas em aterros ou lixões e aqueles decorrentes da geração adicional de eletricidade para alimentar lâmpadas incandescentes foram considerados equivalentes e fora das fronteiras deste estudo.

Tem-se, assim, as seguintes opções para um dado serviço energético (de 10.000 milhões de lumens, equivalentes a pouco mais de 10 milhões de lâmpadas):

- ✓ a manutenção do uso de uma determinada quantidade de lâmpadas incandescentes (sem mercúrio, com maior consumo de energia)
- ✓ a substituição destas por lâmpadas fluorescentes compactas com e sem reator acoplado e
- ✓ a substituição por lâmpadas fluorescentes tubulares com reator e luminária

Para tal, a alternativa proposta, mitigadora desses impactos e dentro do enfoque *Natural Step*, é a prevenção à contaminação ambiental por lâmpadas de vapor de mercúrio através da coleta e reciclagem. Para tal, é necessário se conhecerem:

- ✓ as rotas e os impactos ambientais do mercúrio
- ✓ as restrições legais a seu lançamento
- ✓ as estimativas de suas emissões por fonte e concentrações
- ✓ o potencial de mitigação dos efeitos pela reciclagem
- ✓ o lançamento como alternativa à reciclagem, seus efeitos e externalidades

## **Mercúrio como contaminante**

Todos os tecidos animais e vegetais contêm mercúrio, em quantidades variáveis de acordo com condições locais. A maioria das formas de mercúrio entrando em ambientes aquáticos pode ser convertida bioquimicamente em metil ou dimetil mercúrio. A metilação ocorre na natureza sob condições específicas e determinadas de concentração de mercúrio, pH, temperatura e espécies bacterianas. Se o monometil mercúrio é formado, este pode se acumular em organismos (o nível de mercúrio encontrado em peixes pode ser milhares de vezes maior do que a concentração original do composto na água). Se a forma dimetilica é produzida, esta deve ser dispersa na atmosfera, devido à sua insolubilidade e volatilidade. Há ainda diversos processos de desmetilização no ambiente e em vários animais. Há ainda evidências de que a conversão microbiana de compostos inorgânicos de mercúrio em metil mercúrio pode se dar no solo e em certas plantas e fungos. Grande parte do mercúrio existente está sob a forma de sulfeto, devido à grande quantidade disponível de enxofre no ambiente e à extrema insolubilidade aquosa do composto formado.

Todas as formas de mercúrio são venenosas, mas os alquilmercúrios são muitas vezes mais perigosos do que outras as formas de mercúrio. A dose mínima (não letal) para um adulto pesando 70 kg é de 70mg de mercúrio ou 30 mg de metilmercúrio. Mercúrio metálico pode entrar no organismo por via oral, inalação ou pela pele (derramamentos do metal constituem um perigo potencial devido a sua alta volatilidade). Quanto a sais inorgânicos, seus graus relativos de toxicidade dependem da solubilidade (quanto mais solúvel, mais perigoso se ingerido); em geral a absorção é de até 15%, sendo o resto excretado pelo organismo. Organomercúrios variam em estabilidade e toxicidade: alquilmercúrios são as formas mais estáveis e tóxicas.

As concentrações de mercúrio no ar são em geral baixas e de pequena preocupação. Quando em águas, entrando direta ou indiretamente, pode bioacumular (concentrações em predadores no topo da cadeia alimentar podem chegar a milhões de vezes em relação à concentração na água).

A extensão da exposição humana ao mercúrio pode ser determinada por medições nos níveis de concentração no sangue, cabelo, unhas ou urina. Animais podem exibir sintomas de toxicidade similares ao homem, mas em geral são mais suscetíveis a baixas concentrações. Danos a plantas podem ocorrer em locais com níveis de mercúrio abaixo de  $10^{-5}$  g/m<sup>3</sup> (no homem, o limite mínimo de toxicidade é 5 vezes maior).

No homem, a exposição ao mercúrio ocorre primariamente por ingestão de peixes contaminados sendo que, em altos níveis, é associada a sérios efeitos neurológicos e de má-formações em fetos, estas especialmente devidas ao metil mercúrio. O maior risco é para pessoas que se alimentam regularmente de peixes de uma única localidade contaminada com mercúrio, em especial mulheres com crianças pequenas<sup>2</sup>.

Efeitos agudos e crônicos do mercúrio em humanos são irritabilidade, insônia, alucinações, delírios, tendências suicidas, dores no peito e extremidades, câibras, danos aos rins, danos a funções pulmonares, danos ao trato gastrointestinal, náuseas, vômitos, cegueira, surdez, inconsciência e morte. Metilmercúrio é potencialmente carcinogênico.

## **Mercúrio em produtos**

A concentração média de mercúrio na crosta terrestre é de 70 partes por bilhão em peso, mas pode ser encontrado de forma concentrada em jazidas. Estima-se as reservas exploráveis

---

<sup>2</sup> Nos EUA, mercúrio é a base mais frequente para avisos em corpos d'água, com crescimento de 28% de 1995 para 1996; 39 Estados emitiram avisos para um ou mais corpos d'água e 9 Estados emitiram para todo seu território (Ref. 25).

mundiais em 10 milhões de toneladas do elemento. Em 1983, mais de 90% do fornecimento mundial era feito por seis países: EUA, Espanha, Iugoslávia, Itália, URSS, China e México.

Mercúrio se move através do ambiente como resultado de ações naturais ou antropogênicas. As atividades humanas que respondem pela maior parte da entrada de mercúrio no ambiente são a queima de combustíveis (notadamente carvão) e resíduos contendo o metal, processos industriais e extração de ouro em garimpos.

O mercúrio elemental é utilizado em termômetros, barômetros, manômetros, baterias, lâmpadas, processos industriais, óleos lubrificantes e amálgamas dentários. O uso de mercúrio inorgânico em tintas foi eliminado nos EUA em 1991. Metilmercúrio não possui uso industrial, mas é formado no ambiente a partir do íon inorgânico.

A maior parte dos resíduos de mercúrio provém das indústrias de soda cáustica e cloro (cerca de 50% no Reino Unido em 1983) e baterias (19%). Equipamentos elétricos - inclusive lâmpadas - respondiam no país por 3% do total.

Em países desenvolvidos, a maioria dos produtos contendo mercúrio inorgânico foi banida. Mercúrio foi listado como poluente de grande preocupação nos EUA e Comunidade Européia devido à sua persistência no ambiente, potencial de bioacumulação e toxicidade.

### Mercúrio em lâmpadas fluorescentes

A maioria das lâmpadas fluorescentes contêm quantidades de mercúrio suficientes para serem reprovadas pelo critério de toxicidade da agência ambiental norte-americana (U.S. Environmental Protection Agency - USEPA) e são sujeitas ao tratamento como resíduo perigoso.

A indústria de lâmpadas vem alcançando consecutivas reduções no teor de mercúrio nesses produtos. As lâmpadas F40 T12<sup>3</sup> (53,7% dos 515 milhões de unidades vendidas nos EUA em 1992) atuais contêm 23 mg Hg/unidade (redução de 53% em relação aos níveis de 1985, ou 7,7 t no total, 1992) e visam chegar ao ponto de estado da arte tecnológico de 15 mg Hg (a meta em 1992 era de 20mg para o ano 2000). Apesar das lâmpadas T8 serem mais compactas, ainda não há evidência sobre menores teores de Hg nestes sistemas, para um mesmo serviço energético. Resultados obtidos e esperados para lâmpadas fluorescentes, segundo dados da USEPA, são apresentados na tabela a seguir

**Tabela 2**

Ano / conteúdo mg Hg por lâmpada	T12	T8
Pré - 1996	41	30
1996 - 1999	30	15
2000 -2007	21	10*

\* limite superior; fabricantes (EUA) informam "abaixo de 10 mg Hg"

A redução de mercúrio em lâmpadas, contudo, não é ilimitada. Relatos da National Electrical Manufacturers Association (NEMA) apontam que "níveis insuficientes de mercúrio resultam em uma falha prematura de lâmpadas fluorescentes (*mercury starvation*). Lâmpadas F40T12 com vida nominal de 20.000 h precisam de cerca de 10 mg Hg. Variações no processo de inserção mecânica de mercúrio na lâmpada em geral exigem, para se chegar a este mínimo, de uma dose média de 15 mg Hg por tubo. Lâmpadas fluorescentes compactas contêm entre 5 e 15 mg de mercúrio por unidade, mas seu tempo de vida é menor (8.000 a 10.000h) se comparado aos

<sup>3</sup> A sigla F refere-se ao comprimento da lâmpada (4 pés para F40) e T ao diâmetro (38mm para T12 e 26 mm para T8). No Anexo I é apresentada uma relação de lâmpadas disponíveis no Brasil.

tubos. Algumas, operando em altas condições de emissão de luz, requerem 15 mg Hg para não terem sua vida útil reduzida por *starvation*.

As pesquisas sobre substâncias alternativas ainda não chegaram a um substituto para o mercúrio em termos de produção luminosa, o que significa que lâmpadas sem mercúrio consomem mais energia para um mesmo requerimento de luz (eficiência inferior a 40%). Alguns substitutos são ainda são ambientalmente problemáticos, como o cádmio.

### O mercúrio das lâmpadas no ambiente: aspectos normativos

Limites para concentrações de mercúrio variam de acordo com o meio (ar, água ou solo), usos (ex. potável) e ações (ex. imediata descontaminação do solo), conforme a legislação de cada país, estado ou província.

No Brasil, o padrão para mercúrio em águas varia, conforme o tipo, entre 0,0001 (águas salinas) a 0,002 (classe 3) mg Hg/L. O padrão para solos está em fase de discussão no Estado de São Paulo. Na Comunidade Européia, o limite é de 0,001 mg Hg/L. Dados estes limites, uma lâmpada com 20 mg de mercúrio pode contaminar de 10 a 100 metros cúbicos de água.

Os limites da concentração de mercúrio por país são apresentados na tabela abaixo:

**Tabela 3**

País	Meio	Quantidade	Unidade
EUA	solo	20	ppm (peso)
	águas subterrâneas	0,002	mg/L
Holanda	solo	10	ppm (peso)
	águas subterrâneas	0,002	mg/L
ex-URSS	solo	2	ppm (peso)
Canadá (Quèbec)	solo	10	ppm (peso)
Reino Unido	solo	10	ppm (peso)
França	solo	5	ppm (peso)
		10 (ação imediata)	ppm (peso)
Brasil	solo	n.d. *	
	águas subterrâneas	0,002	mg/L

\* proposta em fase de discussão para o Estado de São Paulo (CETESB). O valor natural (*background level*) é de 0,05 mg/g (ppmp). Há uma tendência para valores similares aos de outros países.

Em aterros sanitários, a maior parte das emissões de mercúrio se dá por percolação, tendo-se uma quantidade mínima liberada sob a forma de gás (0,00001% do total, ou 0,8 kg/ano nos EUA). Em operações de disposição em aterros e lixões, virtualmente todo o mercúrio é liberado das lâmpadas. Mercúrio proveniente de lâmpadas é responsável por 4% da quantidade total do metal em aterros municipais norte-americanos (1989), contribuindo com aproximadamente 24 Mg/ano. Considerando que uma pequena parte extravasa destes depósitos, aterros representam um significativo reservatório de mercúrio, passível de contaminar águas subterrâneas. A U.S. EPA coletou dados em amostras de chorume de 170 aterros municipais, identificando mercúrio em 10 aterros, com concentração mediana em torno de 40% do do valor máximo de concentração de 0,0008 mg/L e o nono decil com 30 vezes o MCL, ou 30% do valor de características tóxicas de 0,061 mg/L. O relatório conclui que mercúrio pode não só vazar de resíduos como também ser transportado para águas subterrâneas em concentrações ambientalmente significativas. Resíduos devem ser submetidos a testes de características tóxicas para mercúrio. Estudos da U.S. EPA

verificaram que a maioria das lâmpadas fluorescentes ultrapassa este limite (algumas ainda são reprovadas quanto a limites por chumbo).<sup>4</sup>

Nos EUA, geradores de resíduos perigosos em quantidades acima de 100 kg por mês (1 kg/mês no caso de resíduos de toxicidade aguda) deverão se responsabilizar pelo seu destino, registrando e reportando quantidades à USEPA<sup>5</sup>. Tal quantidade equivale a 4.200 lâmpadas (de 4 pés) descartadas por ano (350 ao mês), ou um prédio com uma quantidade de cerca de 16.200 lâmpadas. Apenas 22% dos prédios norte-americanos possuem tal porte.

Na Alemanha, a disposição em aterros de quase a totalidade dos resíduos classificados como perigosos estará proibida a partir de 2005, fato que vem motivando o surgimento de uma família de empresas especializadas no tratamento e reciclagem.

### **Situação do mercúrio no Brasil**

Segundo informações do único reciclador de lâmpadas do Brasil (Apliquim), esse processa de 30 mil a 100 mil lâmpadas por mês, obtendo 1 kg de mercúrio a cada 40 mil lâmpadas. Recupera, assim, entre pouco menos de 1 kg a 2,5 kg de mercúrio por mês. Estima para o Brasil um consumo anual de 40 milhões de lâmpadas fluorescentes, ou algo em torno de 1,2 toneladas de mercúrio ao ano.

Esta quantidade equivale a 4% das 300 toneladas anuais importadas legalmente pelo país (o único fornecedor de mercúrio nacional é a Apliquim). Sabe-se ainda que uma grande quantidade seja contrabandeada para as regiões de garimpo, difícil de se estimar. Das 300 toneladas/ano legais, atividades garimpeiras absorvem cerca de 200 toneladas/ano, ficando a indústria com 80 toneladas/ano.

Por uma aproximação grosseira, 50% do consumo nacional de lâmpadas fluorescentes se concentra no Estado de São Paulo e, deste, metade, ou cerca de 10 milhões de lâmpadas/ano, localizam-se na Região Metropolitana de São Paulo.

Os cerca de 31,5 milhões de habitantes do Estado de São Paulo geram 18.232 toneladas de lixo ao dia, sendo apenas 10,9% destinados a sistemas considerados adequados. A Grande São Paulo (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Tietê) possui 15,9 milhões de habitantes, produzindo 10.449 t/dia de lixo, dispostos em lixões e aterros, sendo 74% da quantidade em condições consideradas inadequadas e 26% controladas.<sup>6</sup>

Tem-se assim nesta região algo em torno de 3,8 milhões de toneladas ao ano de lixo, contendo uma estimativa (considerando 10 milhões de lâmpadas/ano com 20 mg Hg/lâmpada) de 0,2 tonelada de mercúrio proveniente de lâmpadas fluorescentes, ou 0,05 ppm em peso em média.

A concentração no solo de 0,05 ppmp, somada ao valor natural de 0,05 ppmp, está a princípio distante de um eventual limite de 2 ppmp para mananciais ou de 5 a 20 ppmp para outras áreas. Contudo, alguns fatores contribuem para que tais concentrações aumentem no lixo gerado, aproximando-se dos limites de tolerabilidade: (a) a progressiva degradação de matéria orgânica em aterros, na faixa entre 50-65%<sup>7</sup>, tende a concentrar mercúrio; (b) a crescente substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes, ainda que estas reduzam seus teores de mercúrio;

---

<sup>4</sup> Vide refs. 22 e 23

<sup>5</sup> A exigência provém do RCRA - Resource Conservation and Recovery Act. A agência também fornece um modelo de cálculo de emissões líquidas de mercúrio, abatendo-se aquelas decorrentes das emissões poupadas de termelétricas a carvão (energia conservada). Vide Refs. 21 e 23

<sup>6</sup> Ref. 3

<sup>7</sup> Ref. 4

(c) a elevada concentração do consumo de lâmpadas fluorescentes, destinando o lixo comercial para determinados aterros ou lixões e; (d) a reciclagem de outros materiais, como papel, aumenta a participação de outros resíduos no total. Como atenuante destes fatores há um aumento na participação de lixo não-orgânico, como embalagens.

Dada a precariedade encontrada nos aterros, inclui-se o não-tratamento do chorume. Assim, considerável parte da carga de 200 kg Hg/ano pode estar percolando em águas superficiais e subterrâneas, com um potencial de contaminação acima do padrão, nesta área geográfica, de 100 milhões de metros cúbicos ao ano.

### **Alternativas para a remoção de mercúrio de águas e solos**

A reciclagem ainda tem seus custos encarados pela maioria da sociedade como uma externalidade ambiental. Contudo, a limpeza de áreas contaminadas também representa um passivo considerável, um alto preço a ser pago por gerações futuras.

Há uma série de alternativas para o tratamento de mercúrio em solos e águas subterrâneas e de superfície. A eficiência no tratamento oferecida por cada tipo de tecnologia depende da natureza química e da concentração inicial de mercúrio, assim como da presença de outros constituintes no meio que interfiram com o processo. Outros fatores, como o gerenciamento dos resíduos e os custos pesam consideravelmente na seleção da tecnologia.

Resíduos contendo mercúrio, em geral tem as seguintes destinações: (a) rios, canais e estuários; (b) redes de esgotos; (c) cavidades naturais no subsolo; (d) lagoas; (e) no solo, em aterros controlados ou lixões; (f) fixação química (ex. processos de solidificação), seguidos de disposição no solo ou; (g) incineração ou retortagem, seguido de aterramento de resíduos.

A seleção de processos de tratamento de resíduos deve levar em conta aspectos como possibilidade de reciclagem, poluição secundária gerada pelo processo a considerar, concentração residual de mercúrio no efluente do tratamento e custos relativos dos diversos processos. A seleção do método de disposição inclui considerações sobre volumes, quantidades, composição e natureza física dos resíduos, localização das emissões e de sítios de disposição. A reciclagem é a opção primariamente recomendada por vários países.

Para a descontaminação e/ou restauração de áreas, recomenda-se práticas tais como: (a) remoção do material contaminado (por bombeamento, dragagem ou escavação. Esta pode ser total ou seletiva, utilizando-se para esta última fluorescência por raios X); (b) tratamento da água residuária, preferencialmente por conversão do mercúrio disponível em sulfeto de mercúrio; (c) adsorção dos sedimentos contaminados e; (d) redução ou amalgamação com outros metais. Alternativas "in situ" incluem a vitrificação, a bioimobilização do metal por bactérias e a destilação, entre outras. Tecnologias existentes incluem, para águas residuárias: precipitação, coagulação/co-precipitação, adsorção por carvão ativado, trocas iônicas, redução química, separação por membrana, tratamento biológico e extração por membranas.

A descontaminação de mercúrio em áreas geralmente apresenta altos custos. Nos Estados Unidos, podem-se citar Winslow Township, NJ (custo total US\$ 7.700.000), Trucksville, PA (custo total US\$593.500) e Robeson, PA (US\$ 618.600)<sup>8</sup>.

### **Reciclagem de lâmpadas fluorescentes**

---

<sup>8</sup> Mais informações estão em <http://www.epa.gov/oerrpage/superfund/sites/cursites/c3pa/s0305260.htm> e <http://www.epa.gov/oerrpage/superfund/sites/cursites/c3pa/s0305322.htm> e na Ref. 18.

## Quantidades envolvidas em reciclagem

Ressalvada a considerável imprecisão, a tabela abaixo apresenta alguns números sobre a geração de lâmpadas usadas por ano no Brasil e no mundo e a situação da reciclagem

**Tabela 4**

Local	Lâmpadas usadas por ano (milhões)	Obs.
Europa	400	
EUA	550	11 t Hg/ano de recuperação potencial
Alemanha	125	40% (50 milhões) coletados, dos quais 35 a 40 milhões reciclados
Escandinávia	35 a 40	25% coletados e tratados (1991)
Holanda	17,5	40% (7 milhões) coletados e processados
Suíça	10	40% (4 milhões) coletados e processados; país considera qualquer recolhimento acima de 12 lâmpadas (4ft) como resíduo perigoso e limita a quantidade de mercúrio no chorume de aterro a 0,01 mg/L
Austria	8	50% (4 milhões) coletados e processados; mesmas restrições da Suíça para aterros
Brasil	40	menos de 2% <sup>9</sup>

## Dificuldades na reciclagem

A reciclagem de lâmpadas possui um potencial para ser uma opção viável e ambientalmente saudável para lâmpadas contendo mercúrio usadas. Vidro pode ser reutilizado na indústria de *fiberglass* (com economia de 25% da energia). Alumínio reciclado permite recuperar até 90% da energia de processo.

Entretanto, enquanto não há uma compulsoriedade legal para a reciclagem, esta opção encontra muitas dificuldades para competir com outras alternativas. Por exemplo, nos EUA, os lançamentos em aterros convencionais, em aterros controlados e reciclagem apresentam custos por tonelada de lâmpadas de, respectivamente, US\$35, US\$400 e US\$1375.

Torna também difícil ao usuário de uma lâmpada, vendida no varejo a US\$1,25 (tubos) sensibilizar-se em dispendar voluntariamente boa parte deste valor para a reciclagem. Nos EUA, cobra-se para a operação de reciclagem entre US\$0,35 e US\$0,70 no caso de tubos, US\$0,80 a US\$2,00 para fluorescentes com formatos irregulares (como as compactas) e US\$ 3,00 a US\$6,00 para lâmpadas com altas concentrações de mercúrio.<sup>10</sup> O desincentivo reflete-se no número de recicladoras no país: apenas 35 em 1995.

Materiais heterogêneos e resíduos perigosos, diferentemente de papel ou alumínio, possuem custos de reciclagem em muito superiores aos valores dos materiais reciclados. Para se equacionar este problema, ou a sociedade toda arca com a despesa da destinação destes resíduos, ou se aplica o princípio do poluidor-pagador, onerando-se, para custear a solução do problema, somente aqueles que se beneficiam dos produtos e bens descartados ou dos serviços que geram a poluição.

<sup>9</sup> Fonte: Apliquim Vide também Anexo III.

<sup>10</sup> Preços para o Brasil estão no Anexo III

A coleta de materiais e produtos recicláveis requer uma logística tanto mais complexa quanto maiores forem os volumes envolvidos, maior for a área abrangida e mais perigosos forem os resíduos.

Entretanto, aspectos financeiros de reciclagem não são favoráveis devido, primariamente, ao baixo valor do material das lâmpadas. Nos EUA (1995), o valor total das matérias primas utilizadas numa lâmpada usada (F40) é inferior a US\$0,05 (o valor do material recuperado é ainda menos; o mercúrio de uma lâmpada F40 T12 vale um décimo de centavo de dólar).

Tais valores reduzidos torna a reciclagem um negócio economicamente precário e sujeito a operações de "para-reciclagem" e "pseudo-reciclagem", como peças de artesanato ou até recipientes para bebidas. Existe ainda um mercado paralelo de lâmpadas usadas e não queimadas. Lâmpadas fluorescentes tubulares são coletadas junto ao lixo de escritório; aquelas que não apresentam manchas pretas junto às extremidades, aparentando novas, são revendidas por lojistas (que, inclusive, as apresentam em embalagens de lâmpadas novas, não entregues ao consumidor na hora da venda).

Adicionalmente, pelo fato da reciclagem ser essencialmente um negócio de grandes volumes e pequenas margens, o esforço constante de indústrias de lâmpadas em reduzir resíduos junto à fonte torna a viabilidade da reciclagem um ainda maior desafio para o futuro. Apesar destes problemas, mercados de reciclagem legítimos e auto-sustentáveis podem ser desenvolvidos em determinadas regiões e para determinados tipos de lâmpadas. Para que estes mercados cresçam, três importantes fatores devem ser considerados: custos de transporte e reciclagem devem ser minimizados e devem existir opções seguras para a reutilização dos materiais recuperados das lâmpadas.

As próprias unidades de recuperação de mercúrio podem apresentar impactos ambientais negativos relevantes, por más práticas operacionais e inadequado controle de emissões. Virtualmente, todas as recicladoras de lâmpadas nos EUA se apresentam fora das especificações federais e estaduais sobre resíduos perigosos. A maioria falha nos aspectos sobre permissões de armazenamento, manifesto de transporte e disposição final de resíduos. Fabricantes de lâmpadas fluorescentes argumentam que se torna difícil, assim, encorajar tais práticas. Perdas de mercúrio em lâmpadas a reciclar se dão no transporte ao reciclador (estimadas em 1% a 15% nos EUA) e na operação de reciclagem (estimadas em 1% a 3%, em função de suas práticas) <sup>11</sup>.

Adicionalmente aos problemas já conhecidos inerentes à reciclagem, outras barreiras que ocorrem no Brasil são a tributação sobre produtos reciclados (uma vez que os produtos primários já foram taxados) e o licenciamento ambiental por resíduo (ao invés de por família de resíduos constituídos pelo mesmo agente poluente), que torna o processo oneroso e de lenta resposta às necessidades ambientais comuns e emergenciais.

### **Aspectos Financeiros Associados à Reciclagem**

As atividades associadas à reciclagem - coleta, armazenamento, transporte e processamento de lâmpadas fluorescentes - refletem num custo não-elétrico adicional ao custo de ciclo de vida anualizado do produto. Este pode ser interpretado como "o custo anual de possuir e operar o equipamento consumidor de energia" e define-se por

$$CCVA = C \cdot FRC(i,n) + PE \cdot E$$

sendo

---

<sup>11</sup> Na reciclagem há perdas entre 10% e 15%, sendo a maior parte recuperada por sistemas de controle de emissões internos à unidade. Vide Ref. 21

FRC (d,n) = fator de recuperação de capital para uma taxa de desconto i (%) e um período n (anos) =  $i/[1-(1+i)^{-n}]$

PE = preço da energia

E = uso anual de energia

e

C = investimento inicial (capital) = [(Plf + Pr + Ct) x no. de lâmpadas/ano]

onde:

Plf = preço das lâmpadas fluorescentes (com reator)

Pr = preço pago ao reciclador

Ct = custos de transporte do local de coleta à instalação de reciclagem

Como apresentado anteriormente, a inclusão deste custo possui um peso relativo considerável especialmente em lâmpadas tubulares, da ordem de 25% do custo de aquisição do produto. Já para lâmpadas fluorescentes compactas, o peso é bem menor, abaixo de 5% do custo.

### Resultados do Balanço Ambiental

Aplicando-se o *Natural Step* à iluminação, busca-se obter o melhor resultado ambiental para um determinado serviço energético<sup>12</sup>. No caso, adotou-se uma determinada quantidade de 10<sup>10</sup> lumens (lm), equivalentes a pouco mais de 10 milhões de lâmpadas, próximo à estimativa de consumo anual de lâmpadas fluorescentes na Grande São Paulo.

O resultado ambiental maximizado busca a mitigação na emissão de poluentes locais, de consumo d'água, de emissão de gases de efeito estufa e da liberação de mercúrio no ambiente. A opção do uso de lâmpadas fluorescentes com reciclagem atinge este objetivo.

A Tabela 5 a seguir sumariza as conclusões obtidas

**Tabela 5**

	Opção de lâmpada			
	1 incandescente	2 fluorescente compacta PLE	3 fluorescente compacta PLC	4 fluorescente tubular
Serviço energético (lm)	820	900	880	800
Potência (W)	60	15	15	22,5
Quantidade de mercúrio estimada * (mg Hg/lâmpada)	0	5	5	20
Tempo de vida estimado (h) <sup>13</sup>	1.000	10.000	10.000	20.000
Numero de lâmpadas para gerar 10 <sup>10</sup> lm	12.195.122	11.111.111	11.363.636	12.500.000
Consumo (kWh) anual para 5 horas de uso ao dia	109,5	27,4	27,4	41,1
Lâmpadas usadas/ano (média) para 10 <sup>10</sup> lm, 5 horas/dia	22.256.098	2.027.778	2.073.864	1.140.625

(continua)

<sup>12</sup> Desconsiderou-se o maior conforto visual proporcionado por lâmpadas incandescentes.

<sup>13</sup> Vide também estudo sobre tempo de vida de lâmpadas na Ref. 11

**Tabela 5 (cont.)**

	Opção de lâmpada			
	1 incandescente	2 fluorescente compacta PLE	3 fluorescente compacta PLC	4 fluorescente tubular
<b>Resíduo de mercúrio (kg Hg/ano) a dispor ou reciclar</b>	<b>0</b>	<b>20,3</b>	<b>20,7</b>	<b>22,8</b>
Geração de NOx** (kg/h)	494	113	115	190
<b>Geração de NOx** (kg/h) adicional sobre a melhor opção</b>	<b>381</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>77</b>
Geração de SO <sub>2</sub> ** (kg/h)	3,8	0,9	0,9	1,4
<b>Geração de SO<sub>2</sub>** (kg/h) adicional sobre a melhor opção</b>	<b>2,9</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,5</b>
Geração de material particulado (MP)** (kg/h)	22	5	5	8
<b>Geração de MP** (kg/h) adicional sobre a melhor opção</b>	<b>17</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>3</b>
Geração de CO** (kg/h)	412	94	96	158
<b>Geração de CO** (kg/h) adicional sobre a melhor opção</b>	<b>318</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>64</b>
Consumo de água** (m <sup>3</sup> /dia)	22.637	5.156	5.273	8.701
<b>Consumo de água** (m<sup>3</sup>/dia) adicional sobre a melhor opção</b>	<b>17481</b>	<b>-</b>	<b>117</b>	<b>3545</b>
Emissão de gases de efeito estufa** (toneladas C equivalente/h)	1857	423	433	714
<b>Gases de efeito estufa*** (toneladas C equivalente/h) adicionais sobre a melhor opção</b>	<b>1434</b>	<b>-</b>	<b>10</b>	<b>291</b>
Áreas alagadas**** (hectares)	33.719	7.680	7.855	12.961
<b>Áreas alagadas**** (hectares) adicionais sobre a melhor opção</b>	<b>26.039</b>	<b>-</b>	<b>175</b>	<b>5.281</b>
<b>Áreas alagadas**** (hectares) adicionais sobre a melhor opção</b>	<b>26.039</b>	<b>-</b>	<b>175</b>	<b>5.281</b>
<b>CCVA da opção (US\$/unidade)*****</b>				
<b>sem reciclagem</b>	<b>5,89</b>	<b>5,68</b>	<b>3,84</b>	<b>4,66</b>
<b>com reciclagem</b>	<b>-</b>	<b>5,54</b>	<b>3,71</b>	<b>4,52</b>
<b>Custo da opção (10<sup>6</sup> US\$)*****</b>				
<b>sem reciclagem</b>	<b>131,1</b>	<b>11,23</b>	<b>7,69</b>	<b>5,16</b>
<b>com reciclagem</b>	<b>-</b>	<b>11,51</b>	<b>7,96</b>	<b>5,32</b>

\* quantidade adotada

\*\* tomada por base a operação de uma termelétrica a gás natural em São Paulo<sup>14</sup>

\*\*\* toneladas de carbono equivalente para CO<sub>2</sub> (mesma base anterior<sup>15</sup>)

\*\*\*\* em hidrelétricas, para garantir potência firme instalada<sup>16</sup>)

\*\*\*\*\* Custo de Ciclo de Vida Anualizado<sup>17</sup>

\*\*\*\*\* para o dado serviço energético<sup>18</sup>

<sup>14</sup> (Ref. 9) Dados para a Usina Termelétrica Bom Jardim, Jundiaí - SP, considerada representativa (usina a gás natural, com potência de 800 MW em ciclo combinado). Emissões de 540kg/h NOx, 450 kg/h CO, 24 kg/h MP, 4,1 kg/h SO<sub>2</sub>, consumo de 24.750 m<sup>3</sup> água (80% consuntivo)

<sup>15</sup> Cálculo aproximado considerando para a Usina Termelétrica Bom Jardim, Jundiaí - SP (Ref.9) , com consumo de 2,9 . 10<sup>6</sup> kg de gás natural/dia, com 70% de carbono em sua composição (adotado este valor, dentro da na faixa 65% a 80%), desprezando-se na contagem CO e MP

<sup>16</sup> (Ref. 12) Base média das 18 maiores usinas brasileiras em 1993, 21,7 kW/Ha. A mais eficiente é Xingó (588,2 kW/Ha) e a menos, Balbina (1,1 kW/Ha). A mencionar Itaipu (93,6 kW/Ha) e Porto Primavera (8,4 kW/Ha)

<sup>17</sup> CCVA calculado para uma lâmpada (com reator para compactas, com metade de um reator e metade de uma luminária, para tubos) multiplicado pelo número de lâmpadas. Juros 19% a.a. tarifa US\$ 44,26/MWh (média de 1998 R\$84,1/MWh dividida por R\$1,90 por dólar). Lâmpadas incandescentes vendidas a US\$ 0,44. Lâmpadas PLC vendidas a US\$ 14. Lâmpadas PLE vendidas a US\$ 5 e reator vendido a US\$ 5. Lâmpada tubo vendida a US\$1,47 ; luminária com reator a US\$ 25 (para 2 lâmpadas). Assumida vida útil do reator e luminárias de 50 anos. Operação de reciclagem e transporte de lâmpadas a US\$ 0,71 a unidade. Fontes: Yamamura, Conduz e Apliquim

<sup>18</sup> CCVA calculado para uma lâmpada (com reator para compactas, com metade de um reator e metade de uma luminária, para tubos) multiplicado pelo número de lâmpadas

Como se pode verificar, o custo da reciclagem tem uma relativamente pequena incidência sobre os valores de custo de ciclo de vida anualizado do produto. Esta opção poderá reter grande parte das quantidades de mercúrio liberadas no ambiente, da ordem de 20 kg Hg para cada 10<sup>10</sup> lm/ano fornecidos, suficientes para contaminar 10 milhões de metros cúbicos de água superficial ou subterrânea acima dos padrões.

A comparação entre os diferentes impactos ambientais não admite um denominador comum, sendo fundamental para sua compreensão a capacidade de suporte do meio.

## Conclusões

A estratégia de comercialização de lâmpadas fluorescentes utiliza-se de argumentos de economia financeira e de conservação em termos ambientais relevando crescentes concentrações de mercúrio no ambiente, decorrente da disposição final destes produtos em aterros e lixões. Atualmente, a parcela de responsabilidade atribuída às lâmpadas fluorescentes pelos impactos do mercúrio e seus compostos no ambiente ainda é relativizada pelas altas emissões de outras atividades antropogênicas, especialmente geração de eletricidade por carvão, processos industriais (principalmente por indústrias de cloro-álcalis) e, especialmente no Brasil, pelas atividades de garimpo de ouro. Padrões de concentração de mercúrio no solo são ainda favoráveis à disposição de lâmpadas em aterros; contudo, o potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas é muito grande, dado o atual nível de gerenciamento dos locais de disposição. Pressões crescentes na legislação ambiental tendem a ampliar o controle sobre as emissões de mercúrio, especialmente em grandes geradores. Produtos como as lâmpadas fluorescentes podem, a exemplo de outras iniciativas em países desenvolvidos, alavancar suas vendas apoiando sua comercialização na filosofia *Natural Step* de sustentabilidade. Ao se embutirem os custos de reciclagem - proporcionalmente baixos dentro dos custos de ciclo de vida dos produtos - e aperfeiçoando as formas de coleta, dirimir-se-ão definitivamente dúvidas de consumidores em relação a lâmpadas fluorescentes como melhor opção ambiental.

## Bibliografia

1. Agência para Aplicação de Energia. **Manual de Administração de Energia - Iluminação**. São Paulo, 1998
2. Buonicore, A. **Cleanup criteria for contaminated soil and groundwater**. ASTM, Philadelphia, 1996
3. CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares - Relatório Síntese, Volume I**. Diário Oficial do Estado de São Paulo (06/03/1998) vol.18 n.44 Seção I, p.4
4. CETESB. **Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos - Relatório Final**. CETESB, 1998
5. Conduz Manutenção Comercial Ltda. Site [www.conduz.com](http://www.conduz.com) acessado em novembro de 1999.
6. Department of the Environment. **Waste Management Paper no. 12 - Mercury-bearing wastes**. HMSO, London, 1983
7. Directive 75/440/CEE
8. Eletrobrás Site [www.eletronbras.gov.br](http://www.eletronbras.gov.br) acessado em novembro 1999
9. Ecology and Environment Inc. **Relatório Ambiental Preliminar para a Usina Termelétrica de Jundiá da Bom Jardim Energética**. Preparado para a Entergy Power Group, submetido à Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo, outubro 1998
10. Hoepfel, R.; Hinchese, R. **Enhanced biodegradation for on-site remediation of contaminated soils and groundwater**. In Wilson, D. and Clarke, A. Hazardous waste site soil remediation. Dekker, New York, 1994
11. INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia - Análise de vida útil lâmpadas. Site [www.inmetro.gov.br/pisca.htm](http://www.inmetro.gov.br/pisca.htm) acessado em novembro de 1999
12. Moreira, J. R.; Poole, A.D. **Hydropower and its constraints**. In Johansson, T. B.; Kelly, H. Reddy, A. K. N.; Williams, R.H. *Renewable Energy - Sources for Fuel and Electricity*. Island Press, 1993
13. MRT Systems AB. **Mercury Recovery Technology** - [www.mrtsystem.com](http://www.mrtsystem.com) tel + 46 455 28700 fax + 46 455 28755 Kaliumvägen 3, S-371 50 Karlskrona Suécia. Cotação elaborada para a Cetesb (Cia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) em 16/11/1998
14. Philips **Catálogo Geral de Iluminação** 1998
15. Resolução CONAMA 20/86
16. The *Natural Step*. Site [www.naturalstep.org](http://www.naturalstep.org) acessado em novembro de 1999.

17. Timmons, D. **In-situ vitrification of wastes contaminated with mercury, arsenic, organic chlorine pesticides and PCBs.** In Hazardous wastes treatment - Treatment of contaminated soils - Proceedings of the 1990 Environmental Protection Agency/ Air and Waste Management Association International Symposium. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, 1990.
18. USEPA. **Abstracts of remediation case studies - March 1995.** Documento EPA-542-R-95-001
19. USEPA **Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps.** Download do site [www.epa.gov](http://www.epa.gov) em novembro 1999
20. USEPA. **Aqueous Mercury Treatment.** Relatório EPA/625/R-97/004, disponível em <http://www.epa.gov/ttnrml/625/R-97/004.htm>
21. USEPA. **Response to Comments Document/ Final Rule for Hazardous Waste Lamps - Comments Related to lamps recycling facilities.** Arquivo rec.pdf, disponível para download em [www.epa.gov](http://www.epa.gov) ).
22. USEPA. **Response to Comments Document/ Final Rule for Hazardous Waste Lamps - Comments Related to Industry Source Regulation Efforts.** Arquivo sred.pdf, disponível para download em [www.epa.gov](http://www.epa.gov) ).
23. USEPA. **Response to Comments Document/ Final Rule for Hazardous Waste Lamps - Comments on the Measurement of Mercury in Lamps: Use of TCLP, MINTEQ.** Arquivo tox.pdf, disponível para download em [www.epa.gov](http://www.epa.gov) ).
24. USEPA. **Hazardous Waste Lamp Rule. Publicada no *Federal Register*** July 6, 1999, (**Volume 64, Number 128, pages 36466-36490**). Acessível através de <http://www.epa.gov/rqytgrnj/programs/artd/headliners/hazlamp.htm>
25. USEPA. **Mercury and Compounds.** Disponível em <http://www.epa.gov/ttnuatw1/hlthef/mercury.html>
26. USEPA. **Mercury Emissions and Electric Utilities** - February 24, 1998 . Disponível em <http://www.epa.gov/ttncaaa1/t3/reports/hg17th.html>
27. Valle, C. E. **Novas Tendências para a Reciclagem de Resíduos.** Revista Meio Ambiente Industrial, n..... p.139
28. World Energy Council. **Survey of Energy Resources 1995** 17<sup>th</sup> ed. p. 148
29. Yamamura Ltda. Site [www.yamamura.com.br](http://www.yamamura.com.br) acessado em novembro de 1999

## ANEXO I

### Alternativas de substituição de lâmpadas

Em função do serviço energético (determinada intensidade de luz a uma determinada potência consumida).

Dados de catálogo de lâmpadas Philips (catálogos 1998)

Lâmpada ou conjunto	Potência P (W)	Fluxo luminoso F (lm)	F/P (lm/W)
Incandescente standard	25	260	10,4
	40	490	12,3
	60	820	13,7
	100	1560	15,6
	150	2440	16,3
	200	3400	17,0
Fluorescente compacta PL electronic	9	400	44,4
	11	600	54,5
	15	900	60,0
	20	1200	60,0
Fl.compacta PLC*	22	1200	54,5
	30	1800	60,0
	13	570	43,8
	15	880	58,7
Fluorescente tubular **	22,5	800	35,6
	37,5	2000	53,3
	23,5	1070	45,5
	39,5	2350	59,5
	23,5	1200	51,1
	39,5	2700	68,4
	27,5	1350	49,1
	47,5	2350	49,5

\* somada à potência perdas de 1 reator RCF, média de 4 W

\*\* somada à potência metade das perdas de 1 reator RCF, média de 7,5 W

## ANEXO II

### Características técnicas de uma planta compacta de recuperação de mercúrio de lâmpadas, custos de capital da instalação e subsídios a cálculo de ponto de equilíbrio econômico-financeiro

Uma unidade completa de reciclagem de lâmpadas de vapor de mercúrio apresenta custos de capital da ordem de um milhão de dólares, que se refletem no preço pago por lâmpada. Para aprimoramento do modelo, seguem os dados sobre custos de capital de uma unidade recicladora, apresentados por uma empresa sueca, válidos para o Brasil. A planta de reciclagem é composta de três unidades: Crush and Separation Plant (C/S), HID lamp Crusher (HID) e Mercury Standard Distiller (MSD).

- ✓ A planta de moagem e separação C/S, do tamanho de um container, foi concebida para processar diferentes tamanhos e formas de lâmpadas fluorescentes. Separa o material em 3 frações: vidro, metais e pó fluorescente. Sua capacidade de processamento é de 350 kg/h, equivalente a aproximadamente 2.000 lâmpadas (de comprimento 1200 mm e diâmetro 25,5 mm) por hora. O consumo elétrico máximo é de 25 kW. As perdas de mercúrio para a atmosfera são entre 0,001 e 0,010 mg/m<sup>3</sup> (max. 0,025 mg/m<sup>3</sup>). O mercúrio contido nos resíduos (vidros e metais) é de até 0,2 mg/l.
- ✓ Um moedor menor é utilizado para lâmpadas de vapor de mercúrio e lâmpadas de sódio de alta pressão (HID lamp crusher).
- O destilador de mercúrio MSD recupera o metal de lâmpadas e pontas de tubo (120 litros/ciclo, em 10h de operação), pó fluorescente (100 litros/ciclo em 16h) e tubos em arco (100 litros/ciclo em 12h), consumindo até 200 kWh por ciclo (potência de 35 kW). A máxima emissão para a atmosfera é de 0,020 mg/m<sup>3</sup> (média 0,005 mg/m<sup>3</sup>). A vazão de exaustão é de até 250 m<sup>3</sup>/h. A concentração de mercúrio nos resíduos (vidro, metal e pó) é de no máximo 0,2 mg/l.

Cálculos feitos pelo fornecedor para as condições brasileiras indicam os seguintes valores:

<b>Volume anual de lâmpadas (tubos)</b>	1.000.000	2.000.000	3.000.000
	US\$	US\$	US\$
<b>Receita total (US\$)</b>	<b>500.000</b>	<b>1.000.000</b>	<b>1.500.000</b>
<b>Valor cobrado por tubo (s/coleta)</b>	0,5	0,5	0,5
<b>Custos totais operacionais (US\$)</b>	337.000	367.000	494.500
<b>Depreciação &amp; juros</b>			
Depreciação 5 anos	132.000	132.000	182.000
Juros 25%	165.000	165.000	227.500
<b>Custos de operação</b>			
MOD: 1 ou 2 operadores	15.000	30.000	30.000
Energia (US\$ 0,1/kWh), O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	5.000	10.000	15.000
etc.			
Análises, partes para reposição	20.000	30.000	40.000
etc.			
<b>Resultado operacional (US\$)</b>	<b>163.000</b>	<b>633.000</b>	<b>1.005.500</b>
<b>Custos de capital</b>	<b>660.000</b>	<b>660.000</b>	<b>910.000</b>
<b>Custo do equipamento (US\$)</b>			
1 unidade C/S	350.000	350.000	350.000
1 ou 2 MSD	250.000	250.000	500.000
1 HID	40.000	40.000	40.000
Transporte e instalação	20.000	20.000	20.000

### ANEXO III

#### Preços de reciclagem e transporte para lâmpadas praticados no Brasil

Fonte: Apliquim - Sr. Ciro do Vale (f. 229 0793; 33131277; 019 8847184)

A única recicladora de lâmpadas no Estado de São Paulo é a Apliquim, localizada em Paulínia. A empresa atende clientes de todo o país (inclusive Coari-AM) e pratica os seguintes preços para seus serviços de reciclagem (em novembro 1999):

Número de lâmpadas	R\$/unidade
< 790	0,71
791 a 3950	0,67
3951 a 7900	0,63
7901 a 15800	0,57
> 15800	0,52

Adicionalmente, há o fornecimento (venda) do container para as lâmpadas:

Capacidade do container (no.lâmpadas)	R\$/container
100 x 20 W	350
100 x 80W	700
1000 x 40W	990
1000 x 80W	1890

O usuário responsabiliza-se pelo transporte. Entre São Paulo e Paulínia, estima-se, para um container (com 1000 lâmpadas, peso bruto 550 kg), transportável por camionete, em custos da ordem de US\$ 15 entre combustível e pedágio.

## ANEXO IV

### Aplicações práticas do Natural Step<sup>19</sup>

Traduzindo-se em termos práticos, para que uma empresa se adeque às condições do *Natural Step*, esta deve tornar a conservação de recursos e minimização de resíduos uma prioridade, buscando eliminar o uso de produtos não recicláveis, monitorar seus progressos e transmitir estas lições. As quatro condições de sistema não são consideradas negociáveis. Alguns casos a mencionar:

- as companhias de papel da Suécia, após encontrar uma inesperada aceitação dos consumidores, voltou-se quase que inteiramente a papéis livres de cloro.
- a rede McDonald's sueca adotou um programa de monitoração de sua adequação a condições de sustentabilidade em bandejas biodegradáveis
- a companhia de óleo sueca advoga a favor de crescentes taxas sobre o gás para financiar pesquisa sobre álcool combustível.
- a empresa de refrigeração Electrolux, pressionada pela rede de supermercados ICA, por sua vez pressionada por seus consumidores, eliminou completamente substâncias destruidoras do ozônio estratosférico de seus produtos, inclusive hidroclorofluorcarbonos de menor poder de destruição
- a Länsförsäkringsgruppen/Wasa Insurance (Lf Insurance Group), baseada em Estocolmo, empresa de seguros fundada em 1840, é líder no segmento comercial, com 4000 empregados e 3600 agentes. Após campanhas de conscientização internas para reduzir o impacto ambiental de suas operações, criaram um manual de sustentabilidade ambiental para a indústria da construção civil, um dos maiores segmentos segurados. Criou então uma modalidade de seguro, "Seguro Reciclagem", baseada na responsabilidade pós-consumo do produtor, vendedor ou importador, imposta pela legislação sueca. Gerencia os prêmios de reciclagem cobrados do consumidor e garante sua aplicação aos produtos após seu uso, amortecendo impactos de flutuação de preços. Auxilia responsáveis na busca de produtos com menor impacto e trabalha diretamente com recicladoras para otimizar operações e obter o melhor preço. Algumas municipalidades chegam a exigir que determinados produtos, como computadores, possuam um seguro de reciclagem. Outros setores com alta taxa de seguro são automóveis, telefones e bens de consumo duráveis.
- JM e o Hammarby Sjöstad Project são outra importante menção. JM, empresa fundada em 1945, é baseada em Estocolmo e possui 1930 empregados. Empresa líder de mercado, é a quarta construtora do país e uma das maiores imobiliárias. Produziu mais da metade das novas unidades de aluguel do país. Suas 148 propriedades, 70% em Estocolmo, perfazem 878 mil metros quadrados de área útil em 1997, sendo 45% escritórios e hotéis e 16% residenciais. Atuando ativamente em todas as fases do empreendimento, focaliza-se em propor soluções vantajosas para o consumo durante todo o ciclo de vida do produto, com vida útil prevista para 100 anos. Em 1997, desenvolveu uma casa com 90% de conteúdo reciclado, com os demais materiais de acordo com requisitos ambientais adotados pela empresa. O interesse pelos assuntos ambientais em desenvolvimento de novos produtos iniciou-se devido ao alto índice (30%) de alergia infantil no país. A partir daí, investiu em aprendizado e treinamento, rotulagem de produtos e em políticas de compras ambientalmente orientadas. JM reduziu o volume de resíduos enviados a aterros em 80%. Estimando que 95% da energia consumida por uma edificação se dá durante seu uso, opta

---

<sup>19</sup> Vide Ref. 16

por investir na fase de construção. Projetos como o Hammarby Sjöstad envolvem recuperação de energia de esgotos, recuperação de áreas degradadas, máxima redução do consumo de recursos, reciclabilidade de materiais e não utilização de substâncias consideradas tóxicas.

- Stena Metall AB, baseada em Estocolmo é uma grande empresa de transporte, comércio e reciclagem. Por meio de três divisões, processa metais ferrosos e não-ferrosos (em 54 unidades na Suécia), veículos e outras sucatas (4 unidades, Suécia), papel (20 unidades entre Suécia e Dinamarca), material fotográfico (coletados na Suécia, Noruega e Finlândia); gerencia serviços financeiros e comercializa metais e ligas, óleo, materiais de construção civil e artigos fotográficos em todo o mundo. Movidos pela necessidade de vantagem competitiva e principalmente pela legislação ambiental sobre a responsabilidade pós-consumo por parte do produtor, certificou-se pela ISO14001 e implementou o *Natural Step*. Inicialmente focalizando treinamento interno e a cadeia de compras, desenvolveu um conceito abrangente de prestação de serviços para seus consumidores, orientando-os para ações de minimização de resíduos e reciclagem.

Duas outras empresas que merecem atenção para a aplicação do *Natural Step* são a IKEA - que fabrica e comercializa móveis com baixo impacto ambiental e alto teor de reciclados - e a Interface - empresa que fabrica e comercializa carpetes através de *leasing*, recolhendo-os e reciclando-os após o uso.