



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Avaliação de Ciclo de Vida de produtos pós-consumo: caso das lâmpadas fluorescentes, uma análise comparativa

*Avaliação dos impactos ambientais associados a diferentes
cenários de disposição final*

Autor: Fernando Panta Teitelbaum

Orientadora: Débora Jung Luvizetto Faccin

Co-Orientador: Geraldo Antônio Reichert

Porto Alegre, julho de 15

*“Por mais que nos fira e doa
A saudade um bem nos faz
É um resto de coisa boa
Que o tempo deixou pra trás”*

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Fundamentos Teóricos	3
2.1.1	Logística Reversa	3
2.1.2	Composição de Lâmpadas Fluorescentes	4
2.1.3	Análise de Ciclo de Vida	5
2.1.4	Categorias de Impacto	6
2.2	Estudos e Aplicações Práticas	8
2.2.1	ACV	8
2.2.2	Logística Reversa	9
3	Estudo de Caso e Metodologia	12
3.1	Metodologia	12
3.1.1	Software	12
3.1.2	Base de Dados	12
3.1.3	Metodologia para o cálculo dos impactos	12
3.1.4	Fundamentos Legais	13
3.2	Modelo	13
3.2.1	Cenário 1 – Sem Logística Reversa	13
3.2.2	Cenário 2 – Com Logística Reversa	14
3.3	Análise de Ciclo de Vida	16
3.3.1	Objetivo e escopo	16
3.3.2	Unidade Funcional	16
3.3.3	Limites do Sistema	16
3.3.4	Inventário	17
4	Resultados e discussões	22
4.1	Impactos associados à produção de Lâmpadas Fluorescentes	22
4.1.1	Clorofluorofosfato de Cálcio	22
4.1.2	Lâmpadas Fluorescentes Tubulares	23
4.1.3	Impacto do transporte no impacto das LF Importadas	24
4.2	Comparação Cenário 1 – Aterro vs Lixão	25
4.3	Comparação dos Cenários 1 e 2 – Considerando a Reciclagem	26
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	28
6	Referências	29

Agradecimentos

À Professora Débora, minha orientadora, por topar esse desafio comigo, pela disponibilidade, ajuda e camaradagem.

Ao Prof Geraldo Reichert, meu co-orientador, pela ajuda na definição do modelo e auxílio na metodologia ACV.

À Mel, que além de querida amiga é a idealizadora desse projeto, ajudou muito na pesquisa e concepção do trabalho.

À empresa Água & Solo, pelo acesso ao Software SimaPro.

À minha família, apoio de todas as horas nessa minha longa caminhada cheia de idas e vindas. A importância deles é grande demais para ser condensada aqui, fica apenas um muito obrigado pra lá de sincero.

Aos meus amigos e amigas, os de longa data e os recentes. Os de perto, os de longe e os de ainda mais longe. São muitas e muitos, e cada um tem um cantinho só seu no meu coração. E se a amizade com aqueles que moram aqui sobreviveu à minha ausência por alguns anos, tenho certeza que a amizade tão forte construída com os que moram longe desses pagos vai sobreviver ainda por muito tempo.

À Montpellier e à Castres, para sempre comigo.

Ao Milan Kundera, ao Pepe Mujica, aos Novos Baianos, à América Latina, ao José Saramago, ao Inter, ao Monteiro Lobato, às utopias, aos Beatles, à Pacha Mama, ao Yes, à internet, ao Luis Fernando Veríssimo, ao D'Alessandro, ao David Foster Wallace, aos Amics de les Arts, ao John Nash, ao Fernandão, ao Eduardo Galeano, à França, ao Macanudo, ao Isaac Asimov e à Mafalda. Nem ao mesmo tempo, nem com a mesma intensidade, mas todos contribuíram de alguma forma para minha formação como ser humano. Outros virão.

Resumo

As Lâmpadas Fluorescentes (LF) ganharam grande destaque pois têm uma vida útil e um rendimento energético superior ao das lâmpadas incandescentes. Contudo, as quantidades de mercúrio que elas contêm têm levantado uma série de questões. Tais questões foram levadas em consideração pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (2012), que tornou a destinação final dos resíduos de LF responsabilidade dos seus fabricantes e importadores. Isso motivou a assinatura do Acordo Setorial dos produtores e importadores de LF no ano de 2014. Este trabalho tem como objetivo avaliar e quantificar os ganhos ambientais da implementação do sistema de Logística Reversa (LR) de LF. Para tal, foi utilizada a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Avaliou-se a disposição final de 1000 kg de LF no município de Porto Alegre para cenários distintos: com ou sem reciclagem de LF e considerando disposição final em lixões ou aterros sanitários. Na comparação entre a disposição em lixões ou aterros sanitários, encontrou-se uma melhora de 90% na categoria Toxicidade Terrestre. Na comparação entre disposição final em aterros sanitários e diferentes graus de reciclagem, os benefícios ambientais começam a estar fora da margem de erro a partir de 50% de reciclagem. Recomenda-se para trabalhos futuros um aperfeiçoamento no modelo da reciclagem dos componentes das LF, maior responsável pelos ganhos ambientais associados à implementação do sistema de LR.

Lista de Figuras

Figura 1 – Cenário 1 de destinação final de LF	14
Figura 2 – Cenário 2 para distribuição final de LF	15
Figura 3 – Detalhamento esquemático dos “Pontos de Coleta”	15
Figura 4 – Etapas de uma ACV	16
Figura 5 – Impactos do Clorofluorofosfato de Cálcio	22
Figura 6 – Impactos das LFT fabricadas no Brasil	23
Figura 7 – Impactos das LFT fabricadas na China	23
Figura 8 – Comparação dos impactos das LFT produzidas no Brasil e na China	24
Figura 9 – Impacto dos transportes em relação às LF Importadas	24
Figura 10 – Comparação destinação final de LF em Aterro Sanitário ou Lixão.....	25
Figura 11 – Comparação entre cenários 1 e 2 de destinação de LF	26

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Categorias de Impacto Disponíveis na Metodologia ReCiPe	7
Tabela 2 – Composição do Clorofluorofosfato de Cálcio	9
Tabela 3 – Categorias de Impacto Escolhidas	12
Tabela 4 – Dados estimados para o mercado de lâmpadas que contêm Hg	17
Tabela 5 – Evolução do mercado brasileiro de LF, de 2006 a 2013	18
Tabela 6 – Quantidade de LF descartadas em Porto Alegre no ano de 2013	18
Tabela 7 – Distribuição de Usuários dos Modais Viários no Brasil.....	19
Tabela 8 – Capacidade recicladora das principais empresas de reciclagem de LF brasileiras	19
Tabela 9 – Destinação das frações de LF pós-reciclagem	20
Tabela 10 – Sub-cenários de reciclagem de LF.....	21

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACV - Análise de Ciclo de Vida

CLSC – Closed-Loop Supplychain

FdV - Fim de Vida

IPC – Índice de Potencial de Consumo

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

LF – Lâmpadas Fluorescentes

LFC – Lâmpadas Fluorescentes Compactas

LFT – Lâmpadas Fluorescentes Tubulares

LR – Logística Reversa

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

UF – Unidade Funcional

1 Introdução

As Lâmpadas Fluorescentes (LF) ganharam destaque no mercado nas últimas duas décadas pois têm uma vida útil e um rendimento energético muito superior ao das lâmpadas incandescentes. Contudo, as quantidades de mercúrio que elas contêm têm levantado uma série de questões sobre a sua legitimidade do ponto de vista ambiental.

Em adição ao problema da quantidade de metais pesados existentes nas LF está a ausência de processos de reciclagem em larga escala, o que faz com que elas tornem-se resíduos perigosos sendo dispostos junto com resíduos domiciliares comuns. Muitas vezes esses resíduos acabam em lixões, o que acarreta no envenenamento do solo e eventuais corpos hídricos próximos por metais pesados, especialmente o mercúrio.

Tais questões foram levadas em consideração pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (2012), que tornou a destinação final dos resíduos de LF responsabilidade dos seus fabricantes e importadores. Isso motivou a implementação de um sistema de Logística Reversa (LR) para essas lâmpadas, que começou a ser implementado nas principais capitais do país no ano de 2015, graças à assinatura do Acordo Setorial dos produtores e importadores de LF no ano de 2014.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar qualitativa e quantitativamente os benefícios ou danos ambientais originados da implementação de um sistema de logística reversa para as lâmpadas fluorescentes. Foram avaliados os cenários presente e futuro de destinação final de LF na cidade de Porto Alegre.

Efetou-se a comparação entre LF produzidas no Brasil e na China, a fim de avaliar se os diferentes cenários de disposição final eram influenciados pela origem do produto. Tal comparação é justificada pelas diferentes abordagens legais que os dois países têm em relação ao mercúrio.

O cenário atual de disposição em aterros sanitários é comparado primeiramente à um cenário hipotético no qual as LF seriam dispostas em lixões. A disposição de resíduos em lixões ainda é uma triste realidade em grande parte das cidades brasileiras, e o objetivo da primeira parte do trabalho é comparar o impacto das LF no meio ambiente quando utilizadas essas duas possibilidades diferentes de destinação final. A partir dessa comparação é possível tecer comentários sobre a validade da universalização dos aterros sanitários como alternativa aos lixões.

Em um segundo momento são considerados cenários de reciclagem das LF em seus principais componentes, mercúrio, vidro e alumínio. Esses componentes são reinseridos na cadeia produtiva evitando assim a sua disposição final em um aterro, assim como a extração de matérias-primas e recursos naturais através da sua reutilização e reinserção no processo produtivo. Os cenários futuros onde há diferentes quantidades de LF sendo recicladas são comparados ao cenário presente onde todas as lâmpadas são dispostas em aterros sanitários. Tal comparação tem por objetivo avaliar os ganhos ambientais oriundos da implementação do sistema de LR além de avaliar as metas estabelecidas pelo Acordo Setorial de um ponto de vista ambiental.

Essas questões foram respondidas através da metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV). A ACV permite, de forma rigorosa e reprodutível, a comparação de diferentes

cenários em escala macro afim de auxiliar a tomada de decisão para questões estratégicas que vão impactar o meio ambiente do país nos próximos anos ou décadas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos Teóricos

2.1.1 Logística Reversa

Assim como a logística e diversos outros conceitos tanto do mundo acadêmico quanto do mundo dos negócios, o conceito de logística reversa também evoluiu com o tempo. Quando o conceito de logística foi definido, ele era referido como o movimento dos materiais do ponto de origem ao ponto de consumo (RODRIGUES et al., 2002).

Bowersox e Closs (2001 *apud* LEITE; BRITO, 2005) definem a logística como a responsável pelo fluxo físico dos materiais no sentido matérias-primas/indústria/consumidor, passando pelos elos dos canais de distribuição. Tipicamente, nas empresas o termo é utilizado para descrever o fluxo de entrada de materiais e o fluxo de saída dos produtos. A tendência é que tal conceito torne-se cada vez mais holístico à medida que as empresas coordenem mais e mais suas ações a fim de reduzir custos e ganhar em produtividade, eficiência e eficácia (BALLOU, 2001 *apud* LEITE; BRITO, 2005).

Analogamente, nos anos 80 a logística reversa foi definida como o movimento de bens do consumidor para o produtor por meio de um canal de distribuição (LAMBERT; STOCK, 1981 *apud* ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 2001). Tal definição é restritiva, pois limita as funções da logística reversa ao movimento de produtos e informações seguindo na direção oposta às atividades logísticas que atendem ao conceito tradicional (também referida no jargão em inglês como “*wrong way on a one-way street*”).

Esse conceito evolui nos anos 1990, com Stock (1992), entre outros, introduzindo novas abordagens para o tema. O escopo da logística reversa passou a englobar o retorno dos produtos, redução de recursos, reciclagem, ações para substituição, reutilização, reparação e remanufatura de materiais, além da disposição final ambientalmente adequada dos resíduos. Carter e Ellram (1998) incluíram a questão ambiental na sua definição de logística reversa.

Rogers e Tibben-Lembke (1999, *apud* DAHER, 2006) definem a logística reversa como:

O processo de planejamento, implementação e controle do fluxo eficiente e de baixo custo de matérias-primas, estoque em processo, produto acabado e informações relacionadas, desde o ponto de consumo até o ponto de origem, com o propósito de recuperação de valor ou descarte apropriado para coleta e tratamento de lixo.

A evolução das demandas sociais e empresariais são a força motriz da evolução de tais conceitos no novo século. Com a efervescência de questões relacionadas ao meio ambiente e à relação das empresas com ele nos últimos anos, o conceito de logística reversa está em plena evolução. Uma dessas definições é proposta por Leite (2005):

Entendemos a logística reversa como a área da logística empresarial que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio dos canais de distribuições reversos, agregando-lhes

valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.

Lacerda (2002 apud GARCIA, 2006) assentou as bases para esta definição, definindo a logística reversa como:

Logística reversa pode ser entendida como um processo complementar à logística tradicional, pois enquanto a última tem o papel de levar produtos de sua origem dos fornecedores até os clientes intermediários ou finais, a logística reversa deve completar o ciclo, trazendo de volta os produtos já utilizados dos diferentes pontos de consumo a sua origem. No processo da logística reversa, os produtos passam por uma etapa de reciclagem e voltam novamente à cadeia até ser finalmente descartado, percorrendo o “ciclo de vida do produto”.

No que tange às definições de logística reversa, tanto em Lacerda (2002 apud GARCIA, 2006) quanto em Leite (2005) são inseridos os conceitos de ciclo de vida do produto e reciclagem, além de referências ao caráter ecológico – em adição ao caráter econômico – como avanços em relação às definições propostas em décadas anteriores.

Na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2012) a logística reversa é definida no artigo 3º, inciso XII como:

O instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo e ou outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Para que tais objetivos sejam cumpridos em relação aos resíduos que devem sofrer ações de logística reversa, a PNRS indica a criação de acordos setoriais. O conceito de acordo setorial é definido no artigo 3º, inciso I da PNRS (2012) como “Ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto”.

A PNRS (2012) define, dessa maneira, a responsabilidade compartilhada entre poder público, importadores e fabricantes pelo ciclo de vida do produto e sua eventual disposição final.

2.1.2 Composição de Lâmpadas Fluorescentes

Com o crescimento das preocupações ambientais a partir da década de 70, diversos produtos passaram a ser vistos através de um prisma diferente. É o caso das lâmpadas fluorescentes (LF), antes vistas como a solução por gastar menos energia que as lâmpadas incandescentes convencionais. Agora, o mercúrio presente em sua composição tem sido motivo de preocupações tanto do público quanto de governos e entidades não governamentais (TAN; LI, 2014).

A *Environmental Protection Agency* – EPA, dos Estados Unidos, considerou as lâmpadas como a segunda maior fonte de mercúrio em resíduos sólidos urbanos, logo após as pilhas e baterias (EPA, 1994).

O mercúrio, na composição na qual está presente nas lâmpadas, encontra-se num estado bastante volátil nas Condições Normais de Temperatura e Pressão CNTP. A European Lighting Companies Federation (ELC) inclusive o considera como a única substância presente na composição das lâmpadas que apresenta alguma relevância ecológica. Tal conclusão deve-se ao fato de que outras substâncias potencialmente perigosas estão presentes em compostos estáveis (p. ex. sódio em sais estáveis) ou dentro da matriz de materiais (p. ex. chumbo em forma de óxido na composição do vidro (ZANICHELII et al., 2004).

Ainda segundo Zanicheli (2004) as lâmpadas fluorescentes no Brasil possuem em média entre 4 e 45 mg de mercúrio, dependendo do tipo de lâmpada pesquisada. Fruto de diversas campanhas de incentivo promovidas pelo governo chinês, na China a quantidade de mercúrio nas LF variou entre 5 e 10 mg em 2010 (TAN; LI, 2014). Nessa mesma época, algumas LF no mercado chinês continham menos de 3 mg (LI et al., 2013).

Ao invés de focar em táticas de logística reversa, a estratégia do governo Chinês é concentrar esforços na diminuição das emissões de Hg a partir do endurecimento da legislação. Mesmo assim, em 2012, aproximadamente 19,75 t foram emitidas na China continental, oriundas de LF quebradas. Espera-se que em 2020 esse valor tenha baixado para aproximadamente 10 t(TAN; LI, 2014).

No trabalho de Scharnhorst et al. (2005), avaliou-se o fim de vida (FdV) de telefones celulares em diversos cenários. Ainda que não sejam lâmpadas fluorescentes, os celulares são resíduos eletroeletrônicos que apresentam características comuns e obedecem à mesma legislação. A emissão de metais pesados para o solo é a maior responsável pelos impactos ambientais no longo prazo.

2.1.3 Análise de Ciclo de Vida

O Relatório Brundtland (1987) abriu um debate na academia sobre o conceito de sustentabilidade e todos que dele advém. Daí surgiu a noção de ciclo de vida de um produto. Brundtland (1987) propõe que “Desenvolvimento sustentável é a capacidade de atender às demandas da geração atual sem colocar em risco a possibilidade das gerações futuras de atender às delas”.

A Análise de Ciclo de Vida (ACV), ou Avaliação de Ciclo de Vida, é uma ferramenta de ajuda à decisão visando a determinar as prioridades de ação diante de uma miríade de medidas possíveis. A ACV avalia o impacto ambiental de um produto levando em consideração a totalidade de fluxos de matéria e energia consumidos/gerados ao longo de todo o seu ciclo de vida, a fim de avaliar os potenciais impactos ambientais a ele associados (ISO 14040, 2006).

Duarte (1997) refere que a SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* apresenta a seguinte definição para a ACV:

A avaliação do ciclo de vida é o processo objetivo de avaliar as cargas ambientais associadas com um produto, processo ou atividade através da identificação e quantificação do uso de energia e matéria e de emissões ambientais, o impacto do uso da energia e material e das emissões, e a determinação de oportunidades de melhorias ambientais. A avaliação inclui todo o ciclo de vida do produto, processo ou atividade, envolvendo extração e processamento de matérias-primas; fabricação, transporte e distribuição; uso/reuso/manutenção; reciclagem; e disposição final.

Na definição de ACV o termo ‘produto’ significa não somente produtos materiais, mas também serviços ou sistemas, como os sistemas de tratamento de resíduos ou de logística reversa (FINNVEDEN, 1999 *apud* AL SALEM et al., 2014).

O ciclo de vida de um produto vai desde a extração de matérias-primas até sua destinação final, tanto na forma de coprodutos, energia ou rejeitos (SAVI et al., 2006). Faz-se necessária, portanto, a definição de critérios para a alocação dos impactos/ganhos ambientais associando-os não apenas ao produto final, mas também aos coprodutos gerados quando da sua geração (AL SALEM et al., 2014).

Alternativamente, o ciclo de vida de um produto também é referido como “berço-túmulo” (CHEHEBE, 1998) ou “berço-reencarnação” (RAMOS, 2001), este último referindo-se ao retorno dos materiais ao sistema produtivo enquanto o primeiro refere-se à destinação final do produto em forma de rejeito.

Prates (1998) e Venzke (2002) definem a ACV como uma abordagem holística que analisa o sistema como um todo, sendo este definido a partir de um determinado produto ou serviço. O sistema inclui a extração de matérias-primas, o processamento, a manufatura, o transporte e a distribuição, o uso e eventual reuso, a manutenção, a reciclagem e o gerenciamento de resíduos (SAVI et al., 2006).

2.1.4 *Categorias de Impacto*

Com a generalização da ACV, houve necessidade de uma harmonização dos métodos de avaliação de impactos, notadamente no que tange às categorias de impacto intermediárias (*midpoint*). A metodologia ReCiPe 2008 foi criada a partir de dois métodos existentes: Eco-Indicator 99 e CML 2002. Essa metodologia dá ao usuário o poder de escolher entre as categorias *midpoint* e as categorias de impacto finais, *endpoint* (GOEDKOOPE & HEIJUNGS, 2009).

Cavalett et al. (2012) referem que, nas categorias *midpoint*, todas as substâncias consideradas dentro dos limites do sistema são agregadas segundo alguma característica comum na cadeia causal que modela os impactos associados ao percurso ambiental de cada substância. Tais características são indicadoras de impacto potencial, mas não representam as consequências finais de tal percurso.

As categorias *endpoint* têm como objetivo quantificar os danos finais das emissões. Elas agrupam várias categorias *midpoint* ao modelar os mecanismos das interações entre elas e sua influência nas áreas de proteção *endpoint* (a saber: saúde humana, espécies animais atingidas e esgotamento de recursos) (CAVALETT et al., 2012).

Os indicadores *endpoint* possuem um grau de incerteza e subjetividade muito maiores, fazendo-os não muito utilizados pela comunidade científica. Por outro lado, como são orientados para o dano, costumam ser mais compreensíveis para os tomadores de decisão. Os indicadores *midpoint* têm um nível de subjetividade menor e uma incerteza muitas vezes mensurável, porém tendem a ser mais técnicos, possuindo menor relevância no suporte à tomada de decisão (BARE et al., 2000).

As 18 categorias de impacto *midpoint* disponíveis na metodologia ReCiPe versão 1.10 são apresentadas na Tabela 1, com a nomenclatura em português, a nomenclatura em

língua inglesa utilizada pela comunidade científica e as abreviações adotadas nesse trabalho.

Tabela 1 – Categorias de Impacto Disponíveis na Metodologia ReCiPe

Categorias de Impacto		
Nome em Português	Nome em Inglês	Sigla
Mudança Climática	ClimateChange	CC
Esgotamento da Camada de Ozônio	Ozone Depletion	OD
Acidificação Terrestre	Terrestrial Acidification	TA
Acidificação de Água Doce	Freshwater Eutrophication	FEut
Eutrofização Marinha	Marine Eutrophication	MEut
Toxicidade Humana	HumanToxicity	HT
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	Photochemical Oxidant Formation	POF
Formação de Material Particulado	Particulate Matter Formation	PMF
Ecotoxicidade Terrestre	Terrestrial Ecotoxicity	TE
Ecotoxicidade de Água Doce	Freshwater Ecotoxicity	FE
Ecotoxicidade Marinha	Marine Ecotoxicity	ME
Radiação Ionizante	Ionising Radiation	IR
Ocupação de Terra Agrícola	Agricultural Land Occupation	ALO
Ocupação de Terra Urbana	Urban Land Occupation	ULO
Tranformação de Terrenos Naturais	Natural Land Transformation	NLT
Esgotamento de Recursos – Água	Water Depletion	WD
Esgotamento de Recursos – Metais	Metal Depletion	MD
Esgotamento de Recursos – Fósseis	Fossil Depletion	FD

2.2 Estudos e Aplicações Práticas

2.2.1 ACV

Resíduos

A metodologia ACV tem sido largamente utilizada para análise e tomada de decisão no gerenciamento de resíduos eletrônicos (KIDEE et al., 2013). Na Europa, muitas pesquisas foram conduzidas para determinar os impactos ambientais de diferentes formas de tratamento de resíduos eletrônicos no seu FdV.

Hischier et al.(2005) estudaram os impactos do sistema de coleta e reciclagem suíço. Os resultados foram de que tais sistemas são claramente vantajosos em relação à incineração.A logística reversa (LR) tem melhores resultados ambientais mesmo quando se desconsidera a destinação final (i. e. Incineração), apenas adicionando ao sistema a produção de matérias-primas no lugar daquelas advindas da reciclagem.

Scharnhorst et al. (2005) compararam seis cenários de FdV de telefones celulares a fim de avaliar qual tratamento seria mais interessante para esses resíduos. No que se refere à fase de FdV, o maior problema são as emissões de metais pesado no longo prazo, daí a importância da reciclagem. Alternativamente a reciclagem diminui os impactos com produção de matérias-primas, dado que metais voltam para o ciclo produtivo.

Barba-Gutiérrez et al. (2008) avaliaram diferentes cenários de FdV de eletroeletrônicos com foco no impacto ambiental gerado pelo transporte durante a fase de logística reversa. Tal análise se faz necessária para a implantação de um sistema ecoamigável, pois se a distância em quilômetros a ser percorrido for grande demais a LR causará mais impacto que o não recolhimento. No trabalho de Barba-Gutierrez et al. (2008) calcula-se a quilometragem limite de um sistema de LR para cada tipo de eletroeletrônico.

Hong et al. (2014) fizeram um inventário completo do tratamento e disposição de resíduos eletroeletrônicos avaliando cenários de disposição final adequada e inadequada. Segundo Hong a disposição final inadequada é significativamente mais impactante notadamente por causa das emissões ao solo geradas pelos metais dispostos em lixões.

Lâmpadas Fluorescentes

Até esse momento, as análises de ciclo de vida feitas tendo lâmpadas como objeto de estudo têm como foco a sua durabilidade, energia gasta e capacidade de iluminação. Lâmpadas enquanto resíduos e estudos de cenários de FdV não têm sido analisados através da metodologia ACV.

Sangwan et al. (2014) estudaram 4 lâmpadas diferentes: incandescente, fluorescente, fluorescente compacta e LED. A unidade funcional foi definida em lúmen-hora, tendo como objetivo estudar a quantidade de luz emitida ao longo de uma quantidade de tempo. O cenário de fim de vida das lâmpadas, não sendo o objeto do estudo, foi modelado supondo 100% de reciclagem e disposição final ambientalmente adequada. É feita a ressalva de que para resultados mais precisos deve-se considerar o FdV dos componentes eletrônicos.

Em outro estudo, Vahl et al. (2013) propõem uma comparação econômico-ambiental de lâmpadas fluorescentes tubulares, compactas e lâmpadas LED. Mesmo mais eficiente, a lâmpada LED ainda apresenta um preço proibitivo diante das concorrentes. Apesar de a lâmpada LED gerar maior quantidade de resíduos, ela não contém resíduos perigosos, tornando-a interessante também do ponto de vista ambiental. Vahl et al. (2013) alertam para a importância de um sistema de logística reversa visando a recuperação de lâmpadas contendo resíduos perigosos, visto que essas são economicamente mais interessantes e devem dominar o mercado nos próximos anos.

O mercúrio está presente nas LF em dois componentes diferentes: em forma metálica e dentro do revestimento interno branco à base de apatita (clorofluorofosfato de cálcio). A Tabela 2 apresenta a composição em mg/kg dos outros metais que compõem o revestimento branco das LF.

Tabela 2 – Composição do Clorofluorofosfato de Cálcio

Elemento	Concentração (mg/kg)	Elemento	Concentração (mg/kg)	Elemento	Concentração (mg/kg)
Alumínio	3000	Chumbo	75	Manganês	4400
Antimônio	2300	Cobre	70	Mercúrio	4700
Bário	610	Cromo	9	Níquel	130
Cádmio	1000	Ferro	1900	Sódio	1700
Cálcio	170000	Magnésio	1000	Zinco	48

Fonte: Alkimia, 2007

2.2.2 Logística Reversa

Mundo

A logística reversa (LR) e a cadeia de distribuição em circuito fechado (*closed-loop supplychain* – CLSC) são objeto de uma revisão bibliográfica proposta por Govindan et al. (2014). Visto o estado da arte da LR/CLSC, a principal via de expansão do conhecimento nessa área é relacionada a objetivos verdes, sustentáveis, ambientais e de resiliência de produto (GOVINDAN et al., 2014).

Em Quariguasi Frota Neto et al. (2007) propõe-se um modelo de LR/CLSC para diversos aparelhos eletroeletrônicos. A implementação de tal cadeia para tais produtos acarreta ganhos ambientais consideráveis. Os ganhos para máquinas de lavar e refrigeradores são devidos à economia de energia, enquanto os ganhos de telefones celulares e computadores são devidos à iniciativas de reuso e remanufatura.

Paksoy et al. (2010) propõem a criação de uma cadeia de distribuição verde (*Green Supply Chain* - GSN) através da adição do critério de emissões de CO₂ no modelo de cálculo da GSN. Junto com esse, existem critérios tradicionais de maximização da oportunidade de lucro, minimização dos custos de transporte e custos de matéria-prima. Na mesma linha, redes de LR/CLSC ecoeficientes são analisadas por Wang et al. (2010).

Os resultados de Wang et al. (2010) e Paksoy et al. (2010) demonstram que a inserção de um critério ambiental mantém um cenário “ganha-ganha” para o meio-ambiente e o setor privado, essa vertente pode, portanto, ser explorada tanto na academia quanto no mercado.

Brasil

No Brasil a logística reversa passou a ser uma exigência legal para certos resíduos com a PNRS (2012). O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) especifica que os resíduos para os quais a implantação de um sistema de logística reversa é obrigatória são: resíduos eletroeletrônicos; pilhas e baterias; lâmpadas fluorescentes; lubrificantes; pneus (IPEA, 2011).

O inciso XVII do artigo 3º da PNRS define a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como:

Conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos.

A PNRS (2012) define que os sistemas de logística reversa sejam implementados e gerenciados através de um acordo setorial, cujas regras devem ser estabelecidas em conjunto entre os diversos atores setoriais e o Estado. O acordo setorial das lâmpadas fluorescentes foi firmado em novembro de 2014 pelo Ministério do Meio Ambiente, as associações de fabricantes de lâmpadas e todos os fabricantes e importadores de forma individual.

O Acordo Setorial de Lâmpadas (BRASIL, 2015), em seu inciso XVI, Cláusula Primeira, define o conceito de Sistema de Logística Reversa (SLR) como “Conjunto de ações para implantação e operação do SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA, que engloba o recolhimento, transporte e DESTINAÇÃO FINAL AMBIENTALMENTE ADEQUADA de LÂMPADAS DESCARTADAS.”

As Lâmpadas que fazem parte do acordo setorial são especificadas no Parágrafo Primeiro da Cláusula Décima Oitava, são elas:

- I. Lâmpadas Fluorescentes Tubulares
- II. Lâmpadas Vapor de Mercúrio;
- III. Lâmpadas Vapor Metálico;
- IV. Lâmpadas Vapor Sódio;
- V. Lâmpadas Compactas;
- VI. Lâmpada Luz Mista;
- VII. Tubos De Vidro; e

VIII. Bulbos De Vidro.

As metas para a performance do SLR são definidas no inciso I da Cláusula Décima Sétima (Acordo Setorial). O objetivo do acordo é que em 2019, 5 anos após a sua assinatura, 20% das lâmpadas objeto do acordo tenham uma destinação final ambientalmente adequada, tomando como base a quantidade de lâmpadas postas no mercado no ano de 2012. O inciso II da mesma cláusula define que uma vez decorrido o prazo de 5 anos, as partes estabelecerão novas metas por meio de termo aditivo.

3 Estudo de Caso e Metodologia

Foi realizada a ACV das LF descartadas em Porto Alegre com foco no impacto ambiental causado pelos resíduos perigosos que são componentes de tais lâmpadas. Esse capítulo introduz o software utilizado, a base de dados e os fundamentos legais para tal estudo de caso. A seguir, explica-se o modelo e os diferentes cenários considerados. Por último, introduz-se a metodologia ACV, apresentando o objetivo do trabalho, os limites do sistema, detalhes importantes do inventário de ciclo de vida e as hipóteses levadas em consideração para a avaliação dos diferentes cenários propostos.

3.1 Metodologia

3.1.1 Software

Uma miríade de *softwares* estão disponíveis para realizar a ACV. No presente trabalho a ferramenta utilizada foi o programa SimaPro versão 8.0.3.14. Ele permite que os impactos ambientais de um sistema sejam analisados sistemática e consistentemente com larga aceitação da comunidade científica.

3.1.2 Base de Dados

A base de dados utilizada como base para a ACV deste trabalho é a Ecolnvent3. Tal base de dados pode ser acessada diretamente através do *software* utilizado e as razões técnicas que motivaram sua escolha já foram apresentadas na seção 2.1.4.

3.1.3 Metodologia para o cálculo dos impactos

De acordo com a seção 2.1.4, a metodologia escolhida para a realização das estimativas propostas foi a ReCiPe. Tal metodologia tem 18 categorias de impacto disponíveis, das quais foram escolhidas oito, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Categorias de Impacto Escolhidas

Categorias de Impacto		
Nome em Português	Nome em Inglês	Sigla
Mudança Climática	ClimateChange	CC
Esgotamento da Camada de Ozônio	Ozone Depletion	OD
Toxicidade Humana	HumanToxicity	HT
Ecotoxicidade Terrestre	TerrestrialEcotoxicity	TE
Ecotoxicidade de Água Doce	FreshwaterEcotoxicity	FE
Ecotoxicidade Marinha	Marine Ecotoxicity	ME
Esgotamento de Recursos – Metais	Metal Depletion	MD
Esgotamento de Recursos – Fósseis	FossilDepletion	FD

As categorias Mudança Climática, Esgotamento da Camada de Ozônio e Esgotamento de recursos Minerais e Fósseis foram escolhidas por apresentar interesse permanente no atual estágio da nossa civilização e necessitarem de monitoramento constante.

As categorias relacionadas à toxicidade foram escolhidas pois a motivação do trabalho envolve o envenenamento dos solos, dos corpos hídricos e em última análise dos seres humanos advindo da contaminação causada pelas grandes quantidades de mercúrio presentes nas LF.

3.1.4 Fundamentos Legais

Conforme referido na seção 2.2.2, a base legal para a implementação de um sistema de LR no que tange às LF foi estabelecida no Acordo Setorial (BRASIL, 2015) que seguiu a PNRS (BRASIL, 2012). Nos termos desse acordo setorial definiu-se uma meta a ser cumprida em 5 anos: ao final desse prazo os atores setoriais se comprometem a dar destinação final ambientalmente adequada para 20% das LF. Tal valor (20% com base no ano de 2012) servirá de base para a modelagem do Cenário 2.

3.2 Modelo

Para a modelagem dos cenários de FdV das lâmpadas fluorescentes foram considerados dois modelos principais, doravante referidos como Cenário 1 e Cenário 2. O Cenário 1 se propõe a modelar a situação atual, sem logística reversa, enquanto o Cenário 2 molda possíveis cenários futuros onde a logística reversa foi integrada à cadeia produtiva em diferentes graus.

3.2.1 Cenário 1 – Sem Logística Reversa

O Cenário 1 considera a situação atual de utilização e destinação final de LF no Brasil. Esse cenário está composto dos seguintes atores:

- Fabricantes nacionais e internacionais
- Importadores
- Distribuidores
- Consumidores domésticos e profissionais (comércio/serviços)
- Aterro Sanitário (destinação final inadequada)
- Lixão

A Figura 1 apresenta de forma simplificada as interações propostas entre os diferentes atores considerados.



Figura 1 – Cenário 1 de destinação final de LF

3.2.2 Cenário 2 – Com Logística Reversa

O Cenário 2 representa uma situação futura desejável a partir da incorporação de um sistema de LR para a destinação final ambientalmente adequada das LF.

Aos atores representados no Cenário 1, adicionam-se os seguintes novos atores:

- Pontos de Coleta
 - Coleta municipal
 - Coleta Privada
 - Coleta Informal
- Empresas Recicladoras
- Aterro Industrial (destinação final ambientalmente adequada)

Nesse cenário, uma parte das LF segue o fluxo apresentado no Cenário 1, enquanto outra parte toma outro rumo, passando por pontos de coleta e sendo encaminhada para empresas recicladoras. Tais empresas reinserem na cadeia produtiva os componentes das LF passíveis de reciclagem e encaminham o rejeito para Aterros Industriais, os quais são a destinação ambientalmente adequada das LF.

A Figura 2 apresenta de forma simplificada as interações entre os atores considerados no Cenário 2.

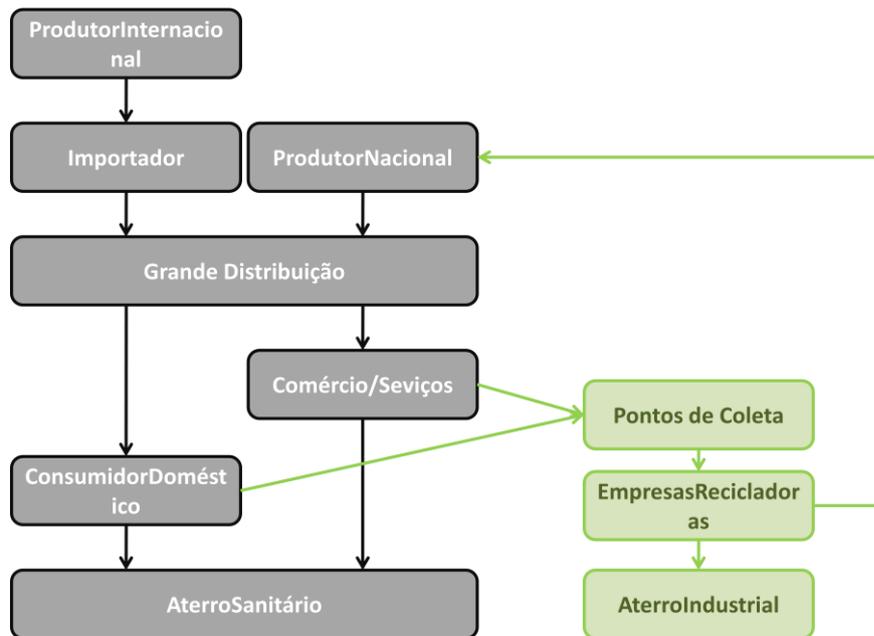


Figura 2 – Cenário 2 para distribuição final de LF

O Cenário 2 dividiu-se em 4 outros cenários considerando-se o percentual atingido pela logística reversa. Os percentuais estabelecidos para a reciclagem tiveram como base as metas do Acordo Setorial (BRASIL, 2015), criando dessa forma cenários base, pessimista e otimista para a avaliação dos resultados do sistema de LR.

Os pontos de coleta, considerados de forma simplificada na Figura 2, são mais complexos, a Figura 3 detalha o seu funcionamento.

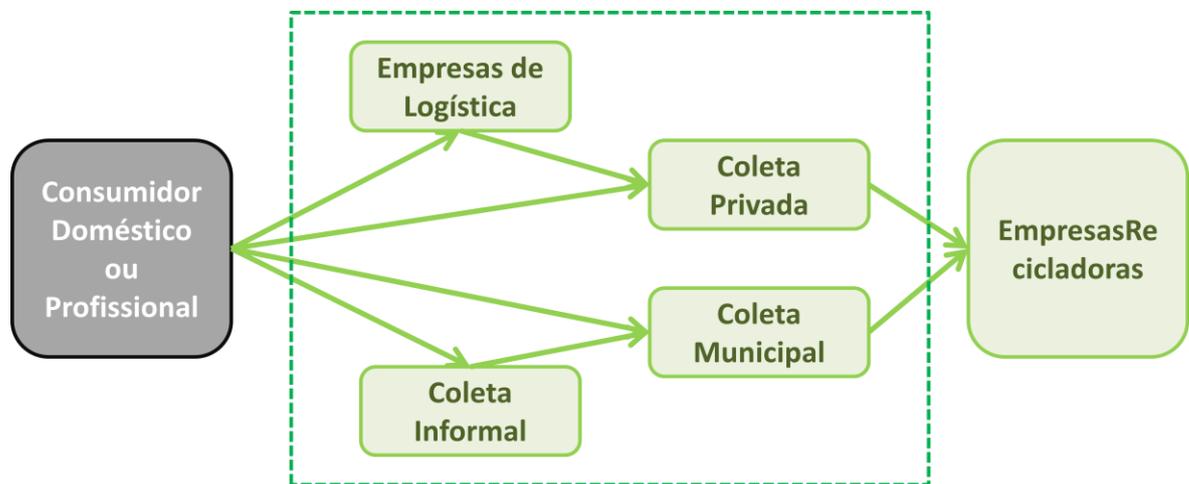


Figura 3 – Detalhamento esquemático dos “Pontos de Coleta”

No modelo proposto os pontos de coleta serão aproximados conforme apresentado na Figura 2. Cabe ressaltar que, caso os impactos ambientais associados aos pontos de coleta sejam elevados em relação à totalidade dos impactos no Cenário 2, um estudo de sensibilidade deve ser feito *a posteriori* levando em consideração a complexidade das interações entre os atores apresentados na Figura 3, as distâncias entre tais atores e eventuais perdas de matéria que possam ocorrer.

3.3 Análise de Ciclo de Vida

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para avaliar o consumo de recursos, os impactos ambientais e a geração de resíduos associados à totalidade do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade. A ACV engloba (1) extração e processamento de matérias-primas, (2) manufatura, transporte e distribuição, (3) uso, reuso e manutenção e (4) reciclagem e disposição final (ISO, 2006). De acordo com a norma ISO 14040, a ACV é composta de quatro fases distintas: definição do objetivo e escopo do trabalho, inventário, análise de impactos e interpretação. Tais etapas estão divididas como na Figura 4.

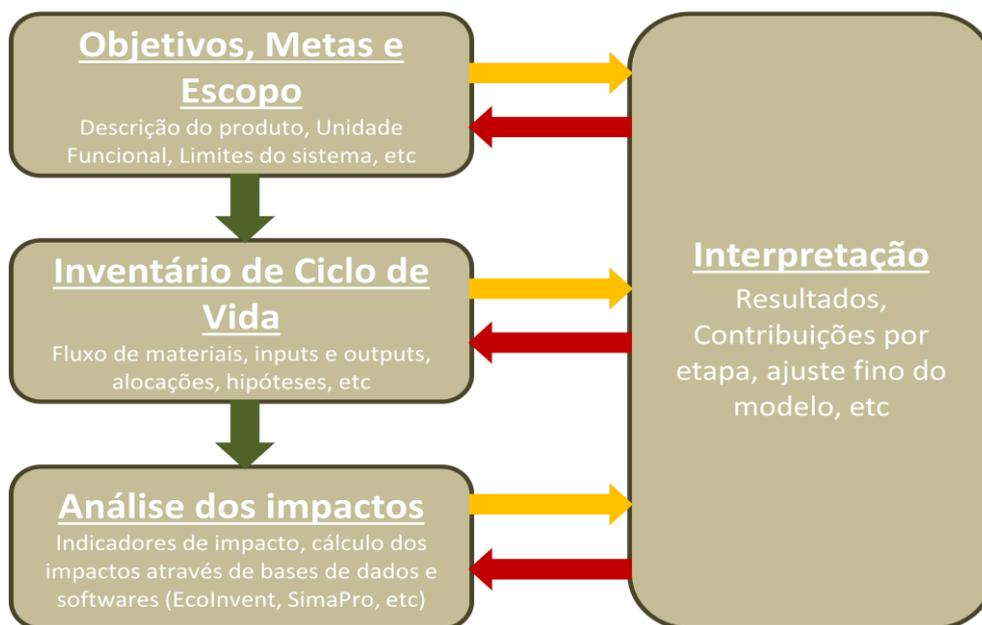


Figura 4 – Etapas de uma ACV

3.3.1 Objetivo e escopo

O objetivo desta ACV é avaliar as diferenças ambientais advindas da implantação de um sistema de LR para as LF, considerando diferentes graus de maturidade de tal sistema e com categorias de impacto relacionadas aos materiais que passariam a ser reciclados e às emissões de Hg que seriam evitadas quando da implementação de tal sistema.

3.3.2 Unidade Funcional

A unidade funcional escolhida para este estudo é “Destinação final de 1 t de resíduos das LF utilizadas na cidade de Porto Alegre”, seja em lixões, Aterros Sanitários, industriais ou através de reciclagem de certos componentes. Essa tonelada de resíduos é composta por diferentes tipos de lâmpadas em diferentes quantidades, respeitando a proporção nacional de utilização.

3.3.3 Limites do Sistema

Conforme referido na seção anterior, a cidade de Porto Alegre será objeto desse estudo. Para tal, as distâncias percorridas ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida serão modeladas tendo as distâncias dessa cidade como referência. Igualmente, as

produções de resíduos de LF por habitante e as condições de destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (aterros sanitários ao invés de aterros controlados ou lixões) consideradas serão as da capital do Rio Grande do Sul.

3.3.4 Inventário

Nesta seção são apresentadas as principais hipóteses para a determinação dos *inputs* e *outputs* dos sistemas associados aos Cenários 1 e 2.

Origem das LF no mercado brasileiro

Segundo estudo da Associação Brasileira de Iluminação (ABILUX, 2008 *apud* IPEA, 2011), a maior parte das LF no mercado brasileiro são importadas. A Tabela 4reproduz a origem das LF por tipo de lâmpada.

Para fins da modelagem do sistema e mantendo a coerência de buscar sempre um cenário plausível, porém que não seja exageradamente otimista, 100% da importação será considerada como vinda da China. Tal país é um importante parceiro comercial brasileiro e está geograficamente distante do Brasil, o que supre os dois critérios desejados.

A produção nacional, seguindo os critérios supracitados, será considerada como sendo oriunda do estado de São Paulo.

Tabela 4 – Dados estimados para o mercado de lâmpadas que contêm Hg

Tipo	Origem	
	Interna	Importada
Fluorescentes Tubulares	80 %	20 %
Fluorescentes Compactas	-	100 %
HID (vapor de mercúrio, vapor de sódio, vapores metálicos)(descarga de alta pressão)	30 %	70 %

Fonte : ABILUX (2008)

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) o Brasil reciclou em 2012 35,2 % do seu alumínio (Al). Esse percentual de reciclagem foi considerado para as lâmpadas de origem interna. Para as lâmpadas produzidas na China, considerou-se que não há Al reciclado envolvido.

Quantidade de Lâmpadas em Porto Alegre

Segundo Grant Thornton (2011) há nesse momento 909 milhões de LF no Brasil. Estudo da Associação Brasileira de Iluminação (ABILUX, 2008 *apud* IPEA, 2011) diz que foram comercializadas mais de 160 milhões de lâmpadas no Brasil ano de 2007. Zanichelli et al. (2004) dizem que a razão entre lâmpadas queimadas e lâmpadas postas no mercado é de aproximadamente 1:1. A evolução do mercado de lâmpadas brasileiro de 2006 a 2013 é apresentada da Tabela 5.

Da Tabela 5 tem-se que, no ano de 2013, foram vendidas no mercado brasileiro aproximadamente 337 milhões de LF.

Para estimar a quantidade de lâmpadas vendidas e descartadas em Porto Alegre utilizou-se o Índice de Potencial de Consumo (IPC) 2012 divulgado pelo SEBRAE e calculado pela IPC Marketing (dados brutos disponíveis em <http://www.sebraeshop.com.br/potencial_consumo/> acesso em 31 mai 2015). Tal índice descreve o potencial de consumo de todos os 5.565 municípios brasileiros, divididos em 21 categorias de consumo.

Tabela 5 – Evolução do mercado brasileiro de LF, de 2006 a 2013

Lâmpadas <i>em unidade de milhar</i>	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Lâmpadas fluorescentes	61,000	65,000	71,000	71,000	75,000	80,000	85,000	90,000
- <i>Crescimento anual</i>	-	6,56%	9,23%	0,00%	5,63%	6,67%	6,25%	5,88%
Lâmpadas fluorescentes compactas	62,000	90,000	110,000	120,000	144,000	170,000	200,000	235,000
- <i>Crescimento anual</i>	-	45,16%	22,22%	9,09%	20,00%	18,06%	17,65%	17,50%
Lâmpadas com descarga de alta intensidade	8,600	8,800	9,500	9,800	10,500	11,100	11500	12,000
- <i>Crescimento anual</i>	-	2,33%	7,95%	3,16%	7,14%	5,71%	3,60%	4,35%
Lâmpadas mistas	2,000	2,000	1,900	1,700	1,500	1,300	1,000	600
Lâmpadas a vapor de mercúrio	2,100	2,000	1,900	1,800	1,600	1,400	1,100	800
Lâmpadas de vapor de sódio	2,900	3,000	3,700	4,300	5,100	5,800	6,500	7,300
Total Brasil	131,600	163,800	190,500	200,900	229,500	261,100	296,500	337,000
<i>Crescimento anual total (em %)</i>	-	23,11%	15,87%	5,30%	13,96%	13,42%	13,15%	13,31%

Fonte: Grant Thornton, 2011

As LF estão contidas dentro da categoria Equipamentos Eletroeletrônicos do IPC. O IPC de Porto Alegre no ano de 2012 para essa categoria é de 1,25% do total de consumo do país. Dessa maneira tem-se que a quantidade de lâmpadas descartadas anualmente na cidade de Porto Alegre é de 4,21 milhões de LF.

As lâmpadas foram divididas conforme os tipos apresentados na Tabela 4. A Tabela 6 apresenta a quantidade e tipo de lâmpadas descartadas na cidade de Porto Alegre no ano de 2013.

Tabela 6 – Quantidade de LF descartadas em Porto Alegre no ano de 2013

Tipo de LF	Quantidade (unidades)
Fluorescente Tubular	1.120.000
Fluorescente Compacta	2.930.000
HID	151.000

Distância percorrida para compra da lâmpada

Rösner (2013) apresenta a divisão dos modais viário brasileiro no ano de 2008. Tal divisão será aproximada àquela da cidade de Porto Alegre. Na Tabela 7 apresenta-se a utilização de meios de transporte considerada nos Cenários 1 e 2.

Tabela 7 – Distribuição de Usuários dos Modais Viários no Brasil

Modal viário	Percentual dos usuários
A pé/Bicicleta	40,6
Transporte Coletivo	29,4
Automóveis	26,9
Motocicletas	3,0

Fonte: Rösner, 2013

Nos Cenários 1 e 2 considerou-se que os usuários deslocam-se 1km para comprar uma LF. Além disso, visto que via de regra cada pessoa adquire mais de um item de cada vez, considerou-se que a lâmpada tem um peso de 10% nesse deslocamento. Ou seja, apenas 10% do impacto ambiental associado ao deslocamento será considerado no impacto do ciclo de vida do produto.

Pontos de Entrega em Porto Alegre

O Acordo Setorial (BRASIL, 2015), em seu Anexo I – Previsão de Municípios com Pontos de Entrega e Número Estimado de Recipientes, prevê que a operação do sistema de LR em Porto Alegre deve começar no ano de 2015, devendo a cidade contar com 17 pontos de coleta. Dada a área e densidade populacional do município, considerou-se um deslocamento de 3 km até o ponto de coleta mais próximo.

Reciclagem de LF

Atualmente o Brasil tem uma capacidade instalada para fazer a reciclagem de aproximadamente 3% das LF descartadas anualmente. A

Dada a baixíssima capacidade instalada em relação ao descarte de lâmpadas no Brasil, e a localização das grandes empresas do ramo fora dos limites do Estado do Rio Grande do Sul, o Cenário 1 considerará que não é realizada reciclagem das LF descartadas na cidade de Porto Alegre. Mesmo sabendo que existem iniciativas isoladas no município, tal hipótese representa a realidade de forma aceitável para um estudo preliminar. Um estudo de sensibilidade deverá ser feito caso pequenas variações percentuais na taxa de reciclagem de LF representarem grandes diferenças nos impactos ambientais associados ao ciclo de vida do produto. A reciclagem das LF, proposta no cenário 2, será realizada em empresas situadas no estado de São Paulo. Tal hipótese representa um cenário plausível e não exageradamente otimista.

Tabela 8 mostra a capacidade instalada e localização das maiores empresas recicladoras do país.

Dada a baixíssima capacidade instalada em relação ao descarte de lâmpadas no Brasil, e a localização das grandes empresas do ramo fora dos limites do Estado do Rio Grande do Sul, o Cenário 1 considerará que não é realizada reciclagem das LF descartadas na cidade de Porto Alegre. Mesmo sabendo que existem iniciativas isoladas no município, tal hipótese representa a realidade de forma aceitável para um estudo preliminar. Um estudo de sensibilidade deverá ser feito caso pequenas variações percentuais na taxa de reciclagem de LF representarem grandes diferenças nos impactos ambientais associados ao ciclo de vida do produto. A reciclagem das LF, proposta no cenário 2, será realizada em empresas situadas no estado de São Paulo. Tal hipótese representa um cenário plausível e não exageradamente otimista.

Tabela 8 – Capacidade recicladora das principais empresas de reciclagem de LF brasileiras

Empresa	Capacidade anual (un/ano)	Localização
Apliquim	900.000	Paulínia, SP
Brasil Recycle	300.000	Indaial, SC
Mega Reciclagem	800.000	Curitiba, PR
Recitec	300.000	Pedro Leopoldo, MG
Hg Descontaminação	400.000	Nova Lima, MG
Tramppo	150.000	São Paulo, SO

Fonte: Grant Thornton, 2011

Quanto às frações de material advindas de resíduos de lâmpadas, elas frequentemente têm os seguintes destinos, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Destinação das frações de LF pós-reciclagem

Fração de saída	Proposta	Cliente
Vidro	Vidro	Indústria de vidro
		Indústria de lâmpada
	Areia abrasiva para limpeza	Indústria de limpeza
	Agente de fusão dentro de fundição de cobre preto	Indústria de metal
	Clínquer	Indústria da construção civil / de cimento
	Subcamada de asfalto	

	Lã de vidro	
	Substituto de silício	Incineradores
Mercúrio	Cátodo	Indústria de cloro / soda cáustica
	Mercúrio	Indústria de lâmpada
Pós (sódio, fósforo, etc.)	Pó fluorescente / de fósforo	Aterro controlado
	Resíduos	Aterro controlado
Tampas e componentes metálicos	Fundição de Metal	Indústria de metal
Plásticos	(Mistura de) plásticos	Indústria de plástico
	Resíduos plásticos	Reciclagem, incineração com recuperação de energia, aterro controlado

Fonte: Grant Thornton (2011)

Metas para Reciclagem de LF

O Acordo Setorial estabelece como meta a reciclagem de 20% das lâmpadas num horizonte de 5 anos. Tendo esse número como base foram estabelecidos 4 sub-cenários dentro do cenário 2. Os cenários considerados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Sub-cenários de reciclagem de LF

Sub-Cenário	Percentual de reciclagem de LF
Cenário 2.1 – Pessimista	10%
Cenário 2.2 – Base	20%
Cenário 2.3 – Otimista	50%
Cenário 2.4 – Ideal	90%

Aterros – Emissões e Distâncias

Os resíduos contaminados considerados são não-voláteis (vidro e metais). Dessa maneira não há emissões para o ar decorrentes da disposição de tais resíduos nos aterros sanitários/industriais. Tais aterros são concebidos para evitar contaminações do solo e água dos arredores.

Assim, considerou-se que uma vez que os resíduos foram dispostos nos aterros, não há mais emissões a eles associadas. No caso da disposição final em lixões, considerou-se que 100% dos metais e resíduos contaminados acabam no solo.

Os Resíduos Sólidos Urbanos da cidade de Porto Alegre são encaminhados para o Aterro Sanitário de Minas do Leão, distante 150km de Porto Alegre. Os resíduos industriais são encaminhados para aterros na região metropolitana. Porto Alegre não encaminha seus resíduos para lixões.

4 Resultados e discussões

4.1 Impactos associados à produção de Lâmpadas Fluorescentes

4.1.1 Clorofluorofosfato de Cálcio

As LF são compostas de vidro, mercúrio, alumínio, argônio e clorofluorofosfato de cálcio. A Figura 5 apresenta os impactos calculados para o Clorofluorofosfato de Sódio, pode-se perceber que há três metais majoritariamente responsáveis pelos danos ao meio ambiente nas diferentes categorias: Fósforo (P), Mercúrio (Hg) e Manganês (Mn).

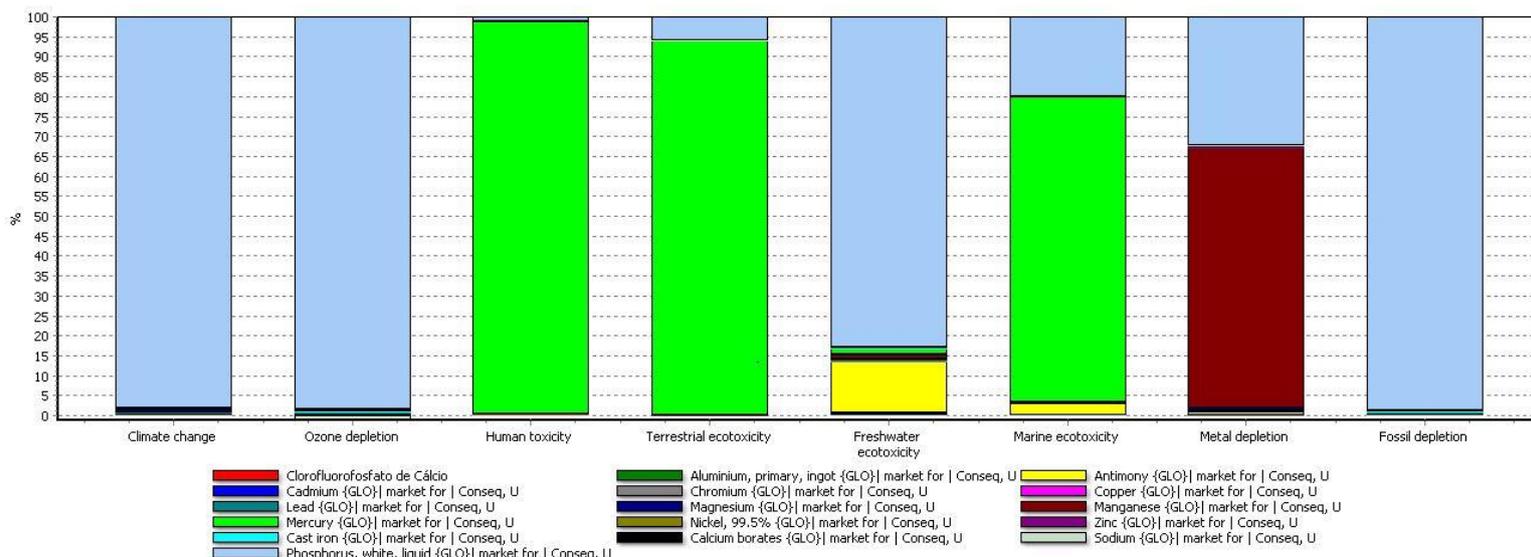


Figura 5 – Impactos do Clorofluorofosfato de Cálcio

O cálculo desses impactos utiliza uma abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, são considerados os impactos causados pela extração e produção de cada um dos metais, mas não os impactos associados ao seu uso e fim de vida. Foi feita tal opção pois os danos ao meio ambiente associados ao uso e FdV desse componente são diferentes de acordo com o cenário considerado (lixão, aterro ou reciclagem), sendo as diferentes possibilidades apresentadas nas próximas seções.

O fósforo do revestimento das LF, representando mais de 80% da sua massa. Isso explica sua grande importância relativa na maior parte das categorias. Nas categorias relacionadas à toxicidade (HT, TE e ME) o Hg é o elemento mais importante. A concentração de 4g/kg e um processo de produção altamente danoso para o meio ambiente explicam a sua preponderância. Chama a atenção a ausência do Hg na categoria Toxicidade de Água Doce (FE). Essa ausência se explica pelas hipóteses de transferência de matéria entre os diferentes compartimentos considerados (água doce, ar, terra, água salgada) levadas em conta pela metodologia ReCiPe.

Na categoria Esgotamento de Recursos – Metais, a produção de Manganês se sobressai em relação aos outros metais. O Mn está presente em uma concentração de 4,7 mg/kg no clorofluorofosfato de cálcio, mas à sua extração é atribuído um peso muito alto na metodologia ReCiPe, indicando que esse metal está ficando cada vez mais escasso para mineração e, portanto, sua utilização tem mais impactos para o futuro da disponibilidade dos recursos minerais.

4.1.2 Lâmpadas Fluorescentes Tubulares

Assim como o Clorofluorofosfato de Cálcio, as LF também contêm Hg em estado puro. O mercúrio é especialmente impactante nas categorias Toxicidade Humana (HT), Ecotoxicidade Terrestre (TE) e Marinha (ME). A Figura 7 apresenta os impactos associados à Lâmpada Fluorescente Tubular (LFT) produzida na China, que tem restrições legais à utilização de Hg nas LF, conforme mencionado na seção 2.1.2. Nas outras categorias, os impactos ambientais dividem-se entre o alumínio e o vidro, os componentes que mais participam para a massa da lâmpada.

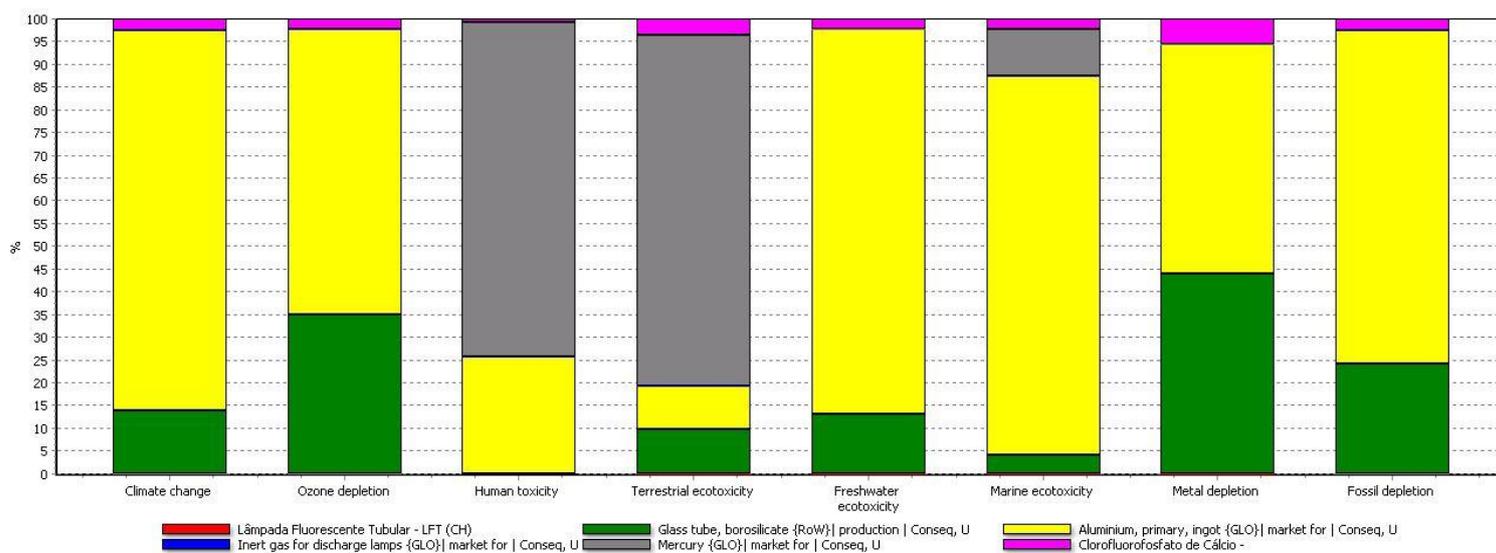


Figura 7 – Impactos das LFT fabricadas na China

A Figura 6 apresenta os impactos associados às LFT produzidas no Brasil. Essas LFT possuem duas diferenças básicas em relação às produzidas na China. O Brasil não impõe as mesmas restrições ao uso do Hg nas LF, dessa maneira uma LFT brasileira tem 18 mg contra 11 mg da LFT chinesa. Por outro lado, o Brasil recicla 35,2% do seu Al enquanto considerou-se que a China não possui reciclagem desse metal para a produção de LF. Na Figura 6 os benefícios ambientais da reciclagem aparecem na forma de contribuições negativas aos impactos de cada categoria.

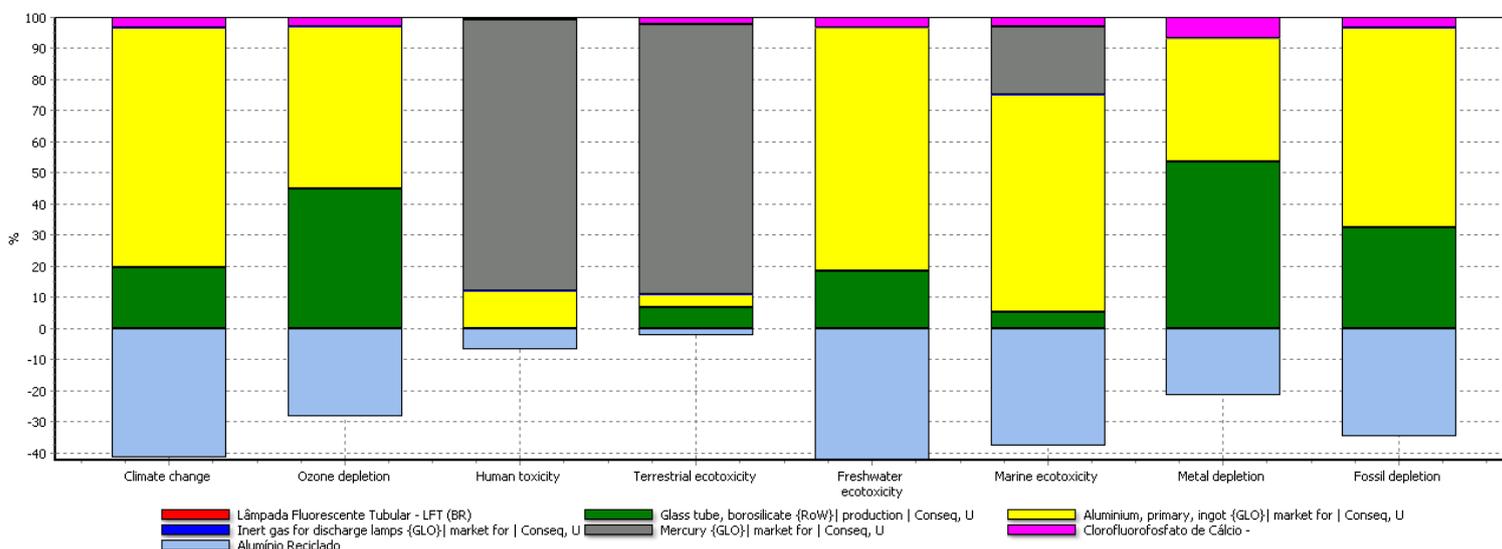


Figura 6 – Impactos das LFT fabricadas no Brasil

A Figura 8 apresenta uma comparação entre uma LFT brasileira e uma chinesa. Nela ficam claros os efeitos das políticas de cada país: A reciclagem de alumínio brasileira faz com que sua LFT seja menos impactante nas categorias onde o Al tem um peso maior. Por outro lado, a LFT chinesa tem melhor desempenho nas categorias HT e TE graças às restrições legais à quantidade de Hg nas LF do país.

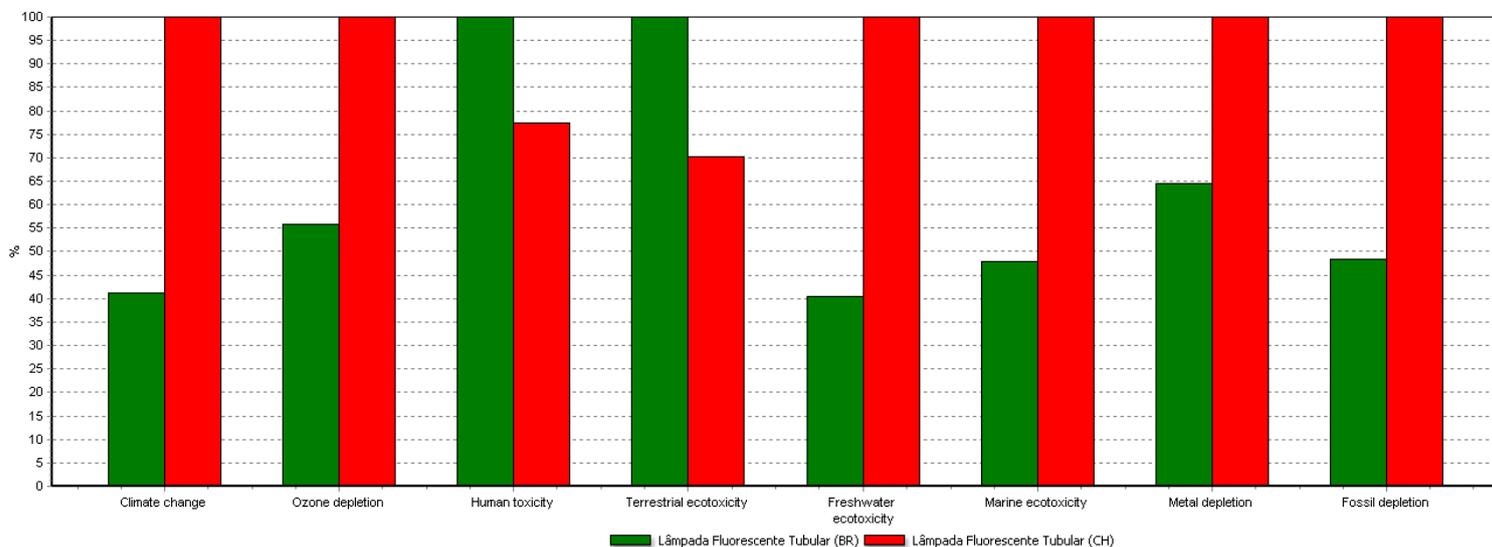


Figura 8 – Comparação dos impactos das LFT produzidas no Brasil e na China

Percebe-se a importância da reciclagem do Al na totalidade dos impactos associados à produção das LF brasileiras. Nas categorias CC, FE e ME o dano ambiental diminuiu aproximadamente 60%. Vê-se também melhorias acima da margem de erro nas categorias OD, MD e FD. Nessas 6 categorias fica demonstrado que a reciclagem do Al é capaz de diminuir substancialmente os danos ao meio ambiente da produção de LF.

Em contrapartida, as restrições chinesas ao Hg diminuíram o impacto das LF na saúde humana em 25% e na toxicidade terrestre em 30%. Esse resultado pode estar subestimado, pois deve ser interpretado à luz de um cenário não exageradamente pessimista nos que tange às LF brasileiras: Zanichelli (2004) reporta que as LF brasileiras contêm de 4 a 45g de Hg. Considerou-se um cenário médio de 18g. Numa hipótese mais pessimista a diferença entre as LF brasileiras e chinesas nas categorias ligadas à toxicidade seriam ainda mais exacerbadas

4.1.3 Impacto do transporte no impacto das LF Importadas

O transporte das LF da China até o Brasil tem um impacto irrisório em todas as

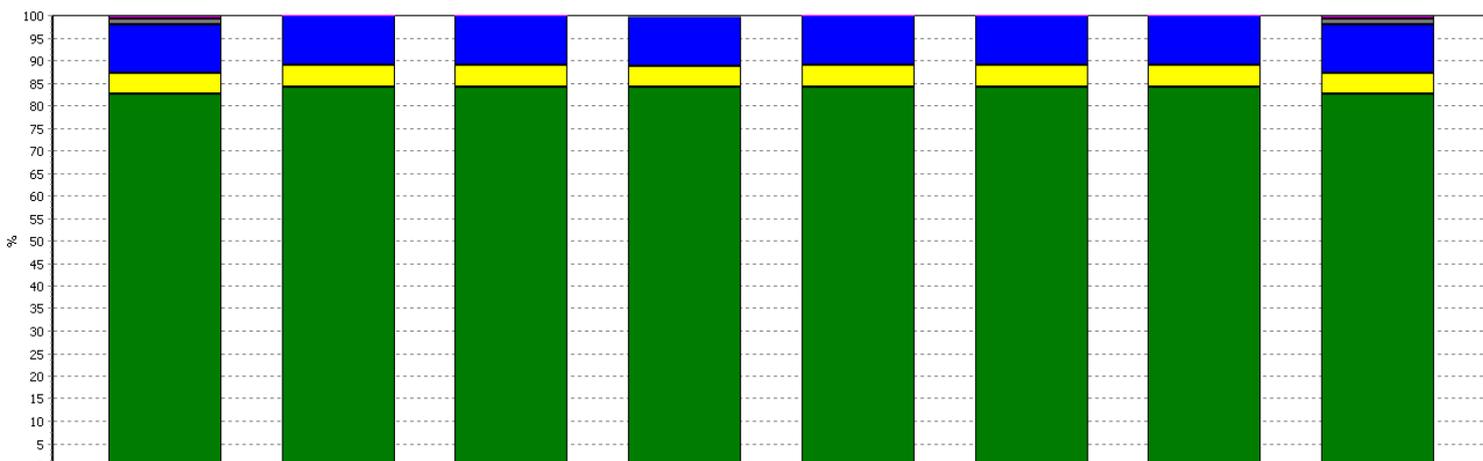


Figura 9 – Impacto dos transportes em relação às LF Importadas

categorias consideradas, atingindo 1% apenas na categoria CC e FD. Dessa maneira, percebe-se que o transporte de mercadorias ao redor do globo não é um problema relevante, neste caso, quando comparado à qualidade das matérias primas utilizadas. A comparação dos impactos dados pelos transportes por terra e água frente aos impactos associados à produção dos três tipos de LF são apresentados na Figura 9.

A diferença percentual nos impactos associados às LFT, às Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFC), e as Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio (HID) é devida às quantidades importadas.

4.2 Comparação Cenário 1 – Aterro vs Lixão

Primeiramente foi considerado o Cenário 1 – aquele no qual não há reciclagem. A comparação foi feita considerando 100% das LF usadas indo para um aterro sanitário ou para um lixão. Conforme referido anteriormente, o município de Porto Alegre encaminha seus resíduos para o Aterro Sanitário de Minas do Leão. Essa não é a realidade da maior parte dos municípios brasileiros, onde a disposição final dos resíduos em lixões ainda é uma realidade. A Figura 10 apresenta a comparação entre os impactos ambientais de 1000 LF (de acordo com a UF) utilizando as duas formas de destinação final propostas.

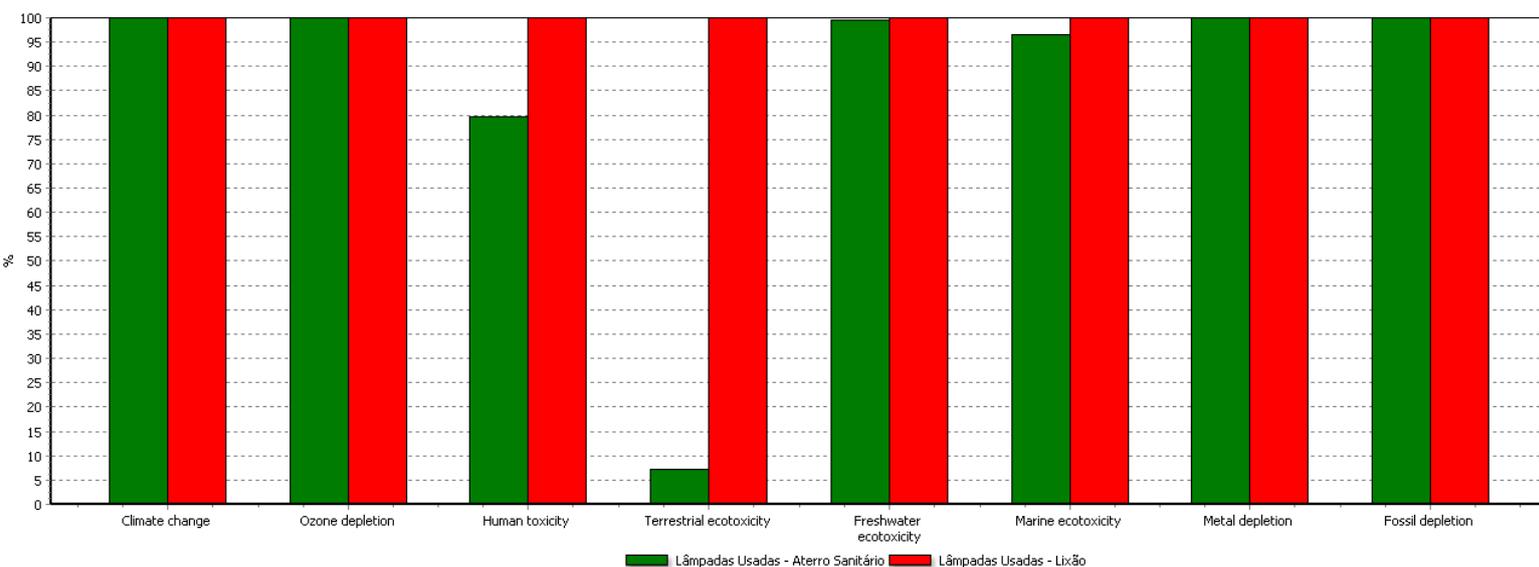


Figura 10 – Comparação destinação final de LF em Aterro Sanitário ou Lixão

Dadas as condições de contato de metais tóxicos com o solo sem impermeabilização existentes em um lixão, a Figura 10 mostra que um aterro sanitário é capaz de reduzir em 93% os danos ao solo (TE), o que acarreta em uma diminuição de 20% nos impactos causados por esses produtos à saúde humana (HT). Fica demonstrada a importância dos aterros sanitários para a destinação final de resíduos potencialmente tóxicos.

O envenenamento do solo considerado pelo modelo pode se estender para corpos de água doce e salgada dependendo das especificidades locais. Num contexto de envenenamento de um corpo d'água o fenômeno de bioacumulação pode ocorrer, acarretando em problemas ao longo da cadeia alimentar e em última análise chegando

também nos seres humanos. É razoável presumir que tanto os 93% relativos à TE quanto os 20 % relativos à HT estão largamente subestimados.

Contudo, para as demais categorias as duas possíveis destinações finais não apresentam diferenças, o que evidencia a importância da reciclagem se analisarmos a questão dos resíduos de uma maneira mais ampla.

4.3 Comparação dos Cenários 1 e 2 – Considerando a Reciclagem

Considerou-se que uma LF reciclada gera vidro, mercúrio e alumínio na forma de matérias-primas. Além disso, o clorofluorofosfato de cálcio esgotado é encaminhado para um aterro. Cada um dos materiais reciclados é reinserido no processo produtivo, evitando assim a utilização de componentes oriundos de recursos naturais.

Conforme apresentado na seção 3.3.4, o Cenário 1 com disposição final em aterros sanitários foi comparado a vários cenários de reciclagem: Pessimista (10%); Base (20%); Otimista (50%) e Ideal (90%). Os resultados são apresentados na Figura 11.

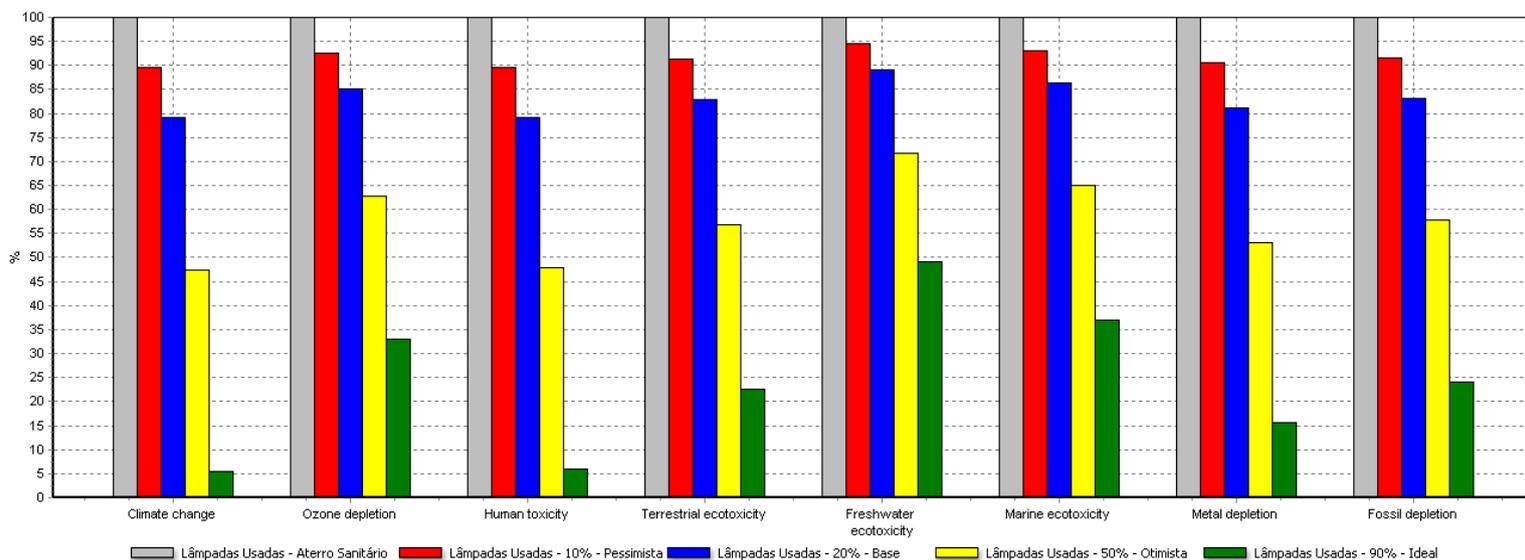


Figura 11 – Comparação entre cenários 1 e 2 de destinação de LF

É possível perceber que há uma tendência de diminuição dos impactos à medida que aumenta o percentual de material reciclado no ciclo de vida das LF. No entanto, para os cenários Pessimista e Base a diminuição é tímida e fica dentro da margem de erro de 20 %. Conclui-se que as metas estabelecidas no Acordo Setorial para os próximos 5 anos são ainda pouco efetivas. Para um cenário em que o objetivo seja um ganho ambiental da ordem de 50% nas categorias de impacto selecionadas, seria necessária a reciclagem considerada Otimista, mais que o dobro da meta prevista pelo Acordo Setorial.

Percebe-se também que a diminuição percentual dos impactos é maior nas categorias onde o Al é o principal poluidor (CC, OD, MD e FD). Isso se explica pois dos 1000 kg de resíduos considerados na UF, 305 kg são Al. O Hg, por outro lado, consiste em “apenas” 92 g. Assim mesmo, no melhor cenário a sua reciclagem representa respectivamente 46 e 28% de diminuição dos impactos de HT e TE.

Também é importante ressaltar que o fato de os limites do sistema serem o município de Porto Alegre é preponderante nos resultados referentes ao Hg (notadamente HT e TE).

Conforme apresentado na seção 4.2, caso o município destinasse seus resíduos em um lixão as diferenças entre os cenários de reciclagem de Hg seriam muito maiores, pois o envenenamento do solo e posterior deterioração da saúde humana seriam levados em conta de maneira muito mais drástica.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Primeiramente, esse trabalho se propôs a demonstrar a importância da universalização dos aterros sanitários como alternativa para destinação final de resíduos no Brasil. A contaminação do solo e do lençol freático evitada com o aterro é da ordem de 90% considerando a totalidade dos impactos associados ao ciclo de vida das LF.

Foi demonstrada também a efetividade ambiental da reciclagem de Al efetuada no Brasil. Da mesma forma, as políticas chinesas de restrição à utilização de Hg nas LF mostrou-se interessante no que diz respeito à toxicidade representada por esse metal pesado.

A comparação dos cenários com e sem reciclagem para o município de Porto Alegre mostra um forte indicativo de que a reciclagem dos componentes das LF é de fato uma alternativa ambientalmente interessante. Há que se dizer que a diminuição dos impactos para os cenários Base e Pessimista (aqueles previstos no Acordo Setorial para os próximos 5 anos) foi pequena, oscilando entre 3 e 20% dependendo da categoria. Metas mais ousadas devem ser estabelecidas visando a uma diminuição efetiva dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida das LF.

O modelo simplificado proposto sugere que o transporte de mercadorias e o sistema de LR não têm uma influência significativa nos impactos ambientais associados ao ciclo de vida das LF. Recomenda-se futuramente uma descrição detalhada do sistema de LR para quantificar os danos ao meio ambiente decorrentes de sua implementação, mesmo que esses sejam muito menores que os ganhos ambientais oriundos das ações de reciclagem por ele geradas.

Cabe ressaltar que o escopo do projeto e o tempo disponível para sua realização não permitiram o aprofundamento necessário para que se tirem conclusões definitivas. É necessário um modelo mais robusto para que qualquer resultado possa ser considerado do ponto de vista quantitativo. Os resultados apresentados podem ser considerados como indicativos qualitativos da importância da adoção de tais políticas setoriais de reciclagem.

De um ponto de vista quantitativo, o principal estudo visando à continuação das pesquisas nessa área envolve uma descrição detalhada dos processos de reciclagem de Hg e Al, dada a sua importância percentual em relação aos resultados finais apresentados. O novo modelo deve incluir gastos energéticos, rendimentos de processo e transporte de mercadorias durante a reciclagem de tais materiais.

Por fim, ressalta-se que a meta de 20 % de LF atingidas pelo sistema de LR é insuficiente para a obtenção de ganhos ambientais significativos. Para tal, no mínimo deveria ser considerada uma meta de 50 % das LF do país. Uma alternativa interessante para atingir resultados semelhantes sem alterar a meta proposta no Acordo Setorial é mantê-la a em 20% e implementar concomitantemente políticas de redução das quantidades de Hg utilizadas nas LF semelhantes às implementadas pelo Governo Chinês.

6 Referências

1. ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 09 junho 2015.
2. ALKIMIA. Estrutura e Funcionamento das Lâmpadas Fluorescentes. Disponível em <<http://alkimia.tripod.com/lampadas.htm>>. Acesso em 07 junho 2015.
3. AL-SALEM, S. M. EVANGELISTI, S. LETTIERI, P. Life cycle assessment of alternative technologies for municipal solid waste and plastic solid waste management in the Greater London area. **Chemical Engineering Journal** **244**, p. 391-402. 2014.
4. BARBA-GUTIÉRREZ, Y., ADENSO-DIAZ, B., HOPP, M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. **Resour. Conserv. Recycl.** v.52 (3), p. 481-495. 2008.
5. BARE J.C, et al. Life cycle impact assessment midpoints vs. endpoints: the sacrifices and the benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.5, n.5, 2000.
6. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Acordo Setorial de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 mar, 2015, v. 48, p. 150.
7. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Decreto de Lei nº 12.305. Estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 ago, 2010, v. 1, p. 3.
8. BRUNDTLAND, G. H. (Org.). **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: FGV, 1987.
9. CARTER, C. ELLRAM, L. Reverse Logistics: A Review of the Literature and Framework for Future Investigation. **Journal of Business Logistics**, v. 19, n. 1, 1998.
10. CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012
11. CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 1998.
12. DAHER, C.; SILVA, E. P.; FONSECA, A. Logística Reversa: Oportunidade para Redução de Custos através do Gerenciamento da Cadeia Integrada de Valor. **Brazilian Business Review**, v. 3, n. 1, pp 58-73, jan/jun 2006.
13. DUARTE, M. D. **Caracterização da rotulagem ambiental de produtos**. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina

14. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **EvaluationOf Mercury EmissionsFromFluorescentLampCrushing**. February, 1994.
15. GARCIA, M. G. Logística reversa: uma alternativa para reduzir custos e criar valor. **XIII SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, nov 2006. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1146.pdf>. Acesso em: 27 abr 2014.
16. Goedkoop, M., & Heijungs, R. **ReCiPe 2008 - A life cycle impact assesement method which comprises harmonised category indicators at the midpont and the endpoint level**. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environement (VROM). (2009).
17. GOVINDAN, K. SOLEIMANI, H. KANNAN, D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. **European Journal of Operational Research** v. 240 pp. 603–626. 2015.
18. Grant Thornton. **Estudo de Viabilidade – Viabilidade técnica e econômica em logística reversa na organização da coleta de resíduos de lâmpadas no Brasil**. Primeira Versão. 2011. Disponível em <> acesso 16 mai de 2015
19. HISCHIER, R. WAGER, P. GAUGLHOFER, J. Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective?: The environmental impacts of the Swiss takeback and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Environmental Impact Assessment Review** v. 25, p. 525–539. 2005.
20. Hong, J. et al. Life cycle assesment of electronic waste treatment. **Waste Management**. 2015.
21. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔNIMA APLICADA - IPEA . **Resíduos cuja logística reversa é obrigatória**. Caderno de Diagnóstico. 2011. Disponível em <> acesso em 16 mai de 2015
22. INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION (ISO-14040). **Environmental Management: Life CycleAssessment/Principlesand Framework**, 2006.
23. IPC MAPS 2012 Metodologia. INDICE DE POTENCIAL DE CONSUMO MARKETING.. Disponível em <http://www.sebraeshop.com.br/potencial_consumo/IPCDocumentos/Metodologia_IPC_Maps_2012.pdf> acesso em 31 mai de 2015
24. KIDDEE, P. NAIDU, R. WONG, M. H. Electronic waste management approaches: An overview. **Waste Management**, v. 33 p. 1237–1250. 2013.

25. LEITE, P. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
26. LEITE, P. ; BRITO, E. Logística Reversa de Produtos Não Consumidos : Práticas de Empresas no Brasil. **GESTÃO.Org – Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, v. 3, n. 3, set/dez 2005. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/gestaoorg/index.php/gestao/article/view/142>>. Acesso em: 27 abril 2015.
27. LI, L., et al. Analysis on reduction trend of mercury releases from Chinese light source production industry for execution of the global legally binding instrument on mercury. **China Illum. Eng. J**, p. 23-26+30. 2013
28. PAKSOY, T. OZCEYLAN, E. WEBER, G. W. A multi objective model for optimization of a green supply chain network. **AIP Conference Proceedings** v. 1239, p. 311. 2010
29. PRATES, G. A. **Ecodesign utilizando QFD, métodos Taguchi e DFE**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina.
30. QUARIGUASI FROTA NETO, J et al. **From Closed-Loop to Sustainable Supply Chains: The WEEE case**. ERIM Report Series Reference No. ERS-2007-036-LIS. 2007
31. RAMOS, J. **Alternativas para o projeto ecológico de produtos**. Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.
32. RODRIGUES, D. et al. **Logística Reversa – Conceitos e Componentes do Sistema**. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba-PR. 2002.
33. ROGERS, D. TIBBEN-LEMBKE, R. **Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices**. University of Nevada, Reno – Center for Logistics Management, 1998.
34. Rösner, S. **Do veículo de passeio para as modalidades ônibus e bicicleta: Tendências à mudança de modal de transporte em Porto Alegre**. Porto Alegre, 2013. Trabalho de Diplomação (Diplomação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul
35. SANGWAN, K. S. et al. N. **Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario**. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering. 2014.

36. SAVI, A. F. GONÇALVES FILHO, E. ; SAVI, E. Engenharia Apoiando o Desenvolvimento Sustentável. **XIII SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, 2006.
37. SCHARNHORST, W et al. The end of life treatment of second generation mobile phone networks: strategies to reduce the environmental impact. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, p. 540–566. 2005.
38. STOCK, J. Reverse Logistics. Oak Brook, IL: Council of Logistics Management, 1992.
39. TAN, Q. LI, J. A study of waste fluorescent lamp generation in mainland China. **Journal of Cleaner Production** v. 81, p. 227-233. 2014.
40. VAHL, F. P. CAMPOS, L. M. S. CASAROTTO FILHO, N. Sustainability constraints in techno-economic analysis of general lighting retrofits. **Energy and Buildings** v. 67 p. 500–507. 2013.
41. VENZKE, C. S. **A situação do ecodesign em empresas moveleiras da região de Bento Gonçalves, RS: análise da postura e das práticas ambientais**. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
42. WANG, Y. LU, T. ZHANG, C.. Integrated logistics network design in hybrid manufacturing/remanufacturing system under low-carbon restriction. **LISS** p. 111–121. 2012.
43. ZANICHELLI, C. et al. **Reciclagem de Lâmpadas: Aspectos Ambientais e Tecnológicos**. Centro de Ciências Exatas Ambientais e de Tecnologias. PUC-Campinas. 2004. Disponível em http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/L%E2mpadas/reciclagem_de_lampadas_aspectos_ambientais_e_tecnologicos.pdf>. Acesso em 02 mai 2015.