

LIXO ZERO: POR UMA ROTA TECNOLÓGICA ALINHADA ÀS DIRETRIZES DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Marcelo Alves de Souza¹

Maryegli Fuss²

Cinthia Versiani Scott Varella³

Francisco de Paula Antunes Lima⁴

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSUs) alinhada aos princípios de sustentabilidade é um tema amplamente discutido pela sociedade moderna, num tempo em que a expansão econômica e as elevadas taxas de consumo geram uma quantidade excessiva de resíduos. Nos países desenvolvidos, além de medidas de incentivo para a prevenção e a redução da geração de resíduos sólidos, o fomento às tecnologias de reaproveitamento, que transformam os RSUs em matéria-prima, como a reciclagem, e as tecnologias de tratamento, que focam na redução da quantidade de material aterrado, como a incineração, têm sido utilizados no sentido de reduzir os impactos ambientais associados à disposição inadequada e ao consumo de recursos não renováveis.

Desde a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tecnologias de gestão de resíduos sólidos municipais adotadas em países desenvolvidos, como a incineração, o plasma e a pirólise, começaram a ser oferecidas aos gestores públicos brasileiros como solução sustentável para o problema do lixo. Ao mesmo tempo, contudo, passaram a ser questionadas em vários aspectos por alguns atores sociais, como o Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR), universidades, organizações não governamentais (ONGs), entre outros.

Alguns trabalhos recentes (Besen e Jacobi, 2011; Antunes Lima *et al.*, 2013; GRS/UFPE, 2013) ponderam que a transferência dessas tecnologias para a realidade

1. Mestrando em engenharia de produção pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); pesquisador do Núcleo Alter-Nativas da UFMG; e engenheiro de produção no Instituto Nenuca de Desenvolvimento Sustentável (Insea).

2. Doutoranda em desenvolvimento sustentável pelo Karlsruhe Instituto de Pesquisa (KIT); e pesquisadora do Instituto de Avaliação da Tecnologia e Análise de Sistema (Itas).

3. Mestra em engenharia de produção pela UFMG; e pesquisadora do Núcleo Alter-Nativas de Produção da Escola de Engenharia da UFMG.

4. Professor associado IV da UFMG, laboratório de ergonomia e organização do trabalho, departamento de engenharia de produção.

brasileira deve levar em consideração os aspectos econômicos, de modo a assegurar a sustentação financeira, ao lado da sustentabilidade ambiental. É necessário, no entanto, adotar uma visão holística na análise crítica das opções tecnológicas, para que não se cometam erros de reducionismo, comuns quando se consideram apenas custos diretos e de curto prazo. Devem ser avaliados e, se possível, mensurados os benefícios sociais, ambientais e econômicos, considerando para cada alternativa tecnológica: custos de médio e longo prazo; possíveis economias de recursos naturais; energia e outros insumos; capacidade de geração de trabalho e renda; potencial de educação e desenvolvimento de uma cultura ambiental; diminuição da pegada ecológica e de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), entre outros. Com este foco, em 2013, o I Seminário Rotas Tecnológicas para a Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos e a Reciclagem diante da Política Nacional de Resíduos Sólidos, realizado na UFMG, em Belo Horizonte, reuniu representantes do poder público, acadêmicos, empresários, catadores e organizações sociais diversas, a fim de discutir tecnologias de tratamento dos RSUs e a inclusão social dos catadores de materiais recicláveis.⁵

Este capítulo procura contribuir para o desenvolvimento dos planos de resíduos sólidos, do nacional ao municipal, que dão concretude aos princípios e às diretrizes da PNRS, por meio da análise dos sistemas integrados de gestão de resíduos sólidos urbanos (SIGRSUs), tal como são aplicados em municípios brasileiros e outras localidades internacionais. A análise é orientada pelos princípios de preservação ambiental, autogestão, solidariedade, distribuição de renda e justiça social, afirmados no seminário supracitado. O resultado a que chegamos, como orientação prática para a definição de rotas tecnológicas sustentáveis alinhadas à PNRS, é que o conceito de “lixo zero” deve ser definido com mais precisão, estabelecendo critérios para a avaliação comparativa de alternativas técnicas, assim como ampliado, incorporando critérios sociais, econômicos e ambientais mais amplos e característicos de diferentes contextos.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa é dividida em três fases, conforme descrito a seguir.

- 1) Estudos de casos nacionais: realização de diagnóstico da situação atual dos SIGRSUs em dois municípios brasileiros: Itaúna, em Minas Gerais, e Londrina, no Paraná. A escolha se justifica pelos bons resultados obtidos em experiências inovadoras na gestão de RSUs, por exemplo, a adoção do conceito de coleta seletiva solidária e a contratação de organizações

5. O seminário produziu coletivamente, como um de seus resultados, o documento *Por uma Rota Tecnológica de Gestão e Tratamento de Resíduos Favorável à Reciclagem*, que foi anexado à Moção de Apoio à Rota Tecnológica da Reciclagem Popular, apresentada na IV Conferência Nacional de Meio Ambiente (CNMA), e aprovado sem contestação. Disponível em: <<http://www.insea.org.br>>.

de catadores para a prestação desse serviço ao município. Os dados levantados são extraídos a partir de relatórios de acompanhamento das experiências e também de entrevistas e visitas locais.

- 2) Estudos de casos internacionais: recolhimento de dados quantitativos e qualitativos de São Francisco (Estados Unidos), Estocolmo (Suécia) e da região da Renânia-Palatinado (Alemanha). Todos os casos internacionais são renomados e citados como exemplos mundiais devido à gestão sustentável dos RSUs, ligada ao conceito de “lixo zero”. Os dados foram coletados por meio de visitas técnicas às estações de tratamento de RSUs na Renânia-Palatinado e em Estocolmo; e publicações internacionais, entrevistas e aplicação de questionário durante visita de representante da municipalidade de São Francisco no *Workshop* Internacional Lixo Zero.⁶
- 3) Resultados e discussão: elaboração de uma base de dados qualitativos e quantitativos, a partir da aplicação da ferramenta Swot (análise de pontos fortes, pontos fracos, ameaças e oportunidades). Essa análise permite salientar os aspectos fundamentais que devem ser considerados na definição de uma rota tecnológica sustentável em conformidade com a PNRS.

Para cada caso explorado ou cada tecnologia estudada são ressaltados aspectos econômicos, sociais e ambientais sobre as rotas tecnológicas escolhidas por cada localidade. Os aspectos econômicos, apesar de importantes para a análise e a decisão sobre a rota tecnológica a se adotar para a gestão de resíduos, não foram detalhados para cada localidade por falta de dados empíricos de todos os casos. Porém, índices gerais foram adotados para basear as considerações.

Em relação a cada aspecto incluído, investigam-se os elementos enumerados a seguir.

- 1) Aspecto econômico:
 - a) despesas de capital (*capital expenditure* – Capex);⁷
 - b) despesas operacionais (*operational expenditure* – Opex);⁸ e
 - c) custo por tonelada.

6. O *Workshop* Internacional Lixo Zero: construindo soluções sustentáveis para a gestão dos resíduos nos municípios foi realizado em Belo Horizonte, no dia 21 de maio de 2014.

7. O Capex, em termos práticos, trata do valor a ser investido nos ativos necessários à operação da tecnologia, incluindo maquinário, obras civis, vias de acesso, instalações e afins.

8. O Opex compreende o custo operacional e de manutenção da instalação tecnológica, englobando salários/retiradas, peças e serviços de manutenção, transporte, insumos, utilidades, entre outros.

2) Aspecto ambiental:

- a) taxa de desvio de material (do aterramento);
- b) indicador de lixo zero (*zero waste index* – ZWI);
- c) energia total substituída;
- d) redução de emissões de GEEs; e
- e) economia de água.

3) Aspecto social:

- a) capacidade de geração de trabalho e renda;
- b) capacidade de inclusão socioprodutiva; e
- c) potencial de educação e desenvolvimento de uma cultura ambiental.

O ZWI é um instrumento comparativo desenvolvido por Zaman e Lehmann (2013), cuja finalidade consiste em avaliar e mensurar, para os sistemas municipais de gestão de resíduos sólidos que adotam o conceito de lixo zero, o potencial de compensação ambiental da matéria-prima que deixará de ser consumida. Dessa forma, representa uma ferramenta alternativa e mais completa para a avaliação dos SIGRSUs.

Desde os anos 1970, o conceito de lixo zero se propaga como uma filosofia em que a sociedade moderna se responsabiliza por estabelecer novas bases do ciclo de vida dos RSUs. Desse modo, o ZWI tem se tornado internacionalmente um indicador que possibilita comparar a performance e o desenvolvimento dos sistemas municipais de gestão de resíduos sólidos. O ZWI é determinado por meio da fórmula matemática representada pela equação 1 (Zaman e Lehmann, 2013).

$$ZWI = \frac{\sum_1^n WMS_i \cdot SF_i}{\sum_1^n GWS} \quad (1)$$

Onde:

- WMS_i é a quantidade de resíduos geridos pelo sistema i em toneladas (ou seja, $i = 1, 2, 3... n$ é o volume de resíduos reciclados, tratados, entre outros);
- SF_i é o fator de substituição para os diferentes sistemas de gestão de resíduos com base em sua eficiência de reposição da matéria-prima em toneladas; e
- GWS é o volume total de resíduos gerados em toneladas.

É importante destacar que foram adotados valores-referências baseados em diversas literaturas nos casos em que os pesquisadores esbarraram na limitação de obtenção dos dados empíricos de certa experiência ou tecnologia. Essa posição foi

adotada visando manter uma completude para a análise perpetrada, mesmo diante da limitação dos dados conseguidos.

3 ESTUDO DE CASOS

De acordo com a metodologia adotada nesta pesquisa, foram estudados e analisados casos nacionais (Itaúna e Londrina) e rotas tecnológicas internacionais (São Francisco, Renânia-Palatinado e Estocolmo). Tecnologias de reaproveitamento de resíduos sólidos foram exploradas conforme cada caso internacional, como a reciclagem, a compostagem, a digestão anaeróbica, e a incineração com geração de energia elétrica e ciclo combinado (energia elétrica e térmica). Para cada caso, buscou-se conhecer a realidade atual do gerenciamento de resíduos na localidade, identificar as caracterizações qualitativa e quantitativa dos resíduos gerados e tratados, verificar o nível de cooperação e conscientização ambiental e medir os resultados gerais das rotas tecnológicas adotadas. A seguir, a descrição dos estudos de caso é apresentada de acordo com os dados extraídos e coletados de relatórios e entrevistas.

3.1 Estudo de casos nacionais

3.1.1 Itaúna

A cidade de Itaúna, localizada a 80 km de Belo Horizonte, possui uma população estimada em cerca de 90 mil habitantes, sendo 94% desse total residentes na área urbana (IBGE, 2013). Dados apresentados pelo Plano Municipal de Saneamento Básico demonstram que a geração diária de RSUs *per capita* está em torno de 250 kg por habitante/ano. O gráfico 1A mostra a composição gravimétrica dos resíduos gerados pelo município. Verifica-se que os resíduos sólidos recicláveis (papel, plástico, vidro e metal) representam em torno de 30% do total produzido atualmente (Itaúna, 2014). No gráfico 1B, observa-se que Itaúna apresenta uma fração significativa de reciclagem (para experiências brasileiras): do total de 22.200 t de RSUs geradas por ano, 3 mil são recicladas e 19.200, aterradas.⁹

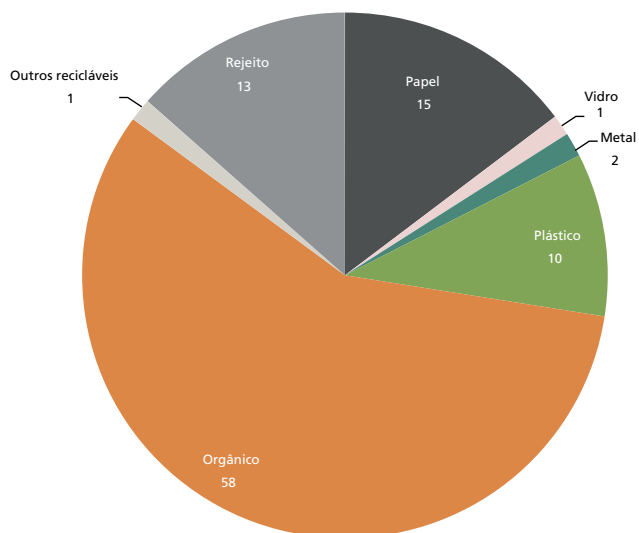
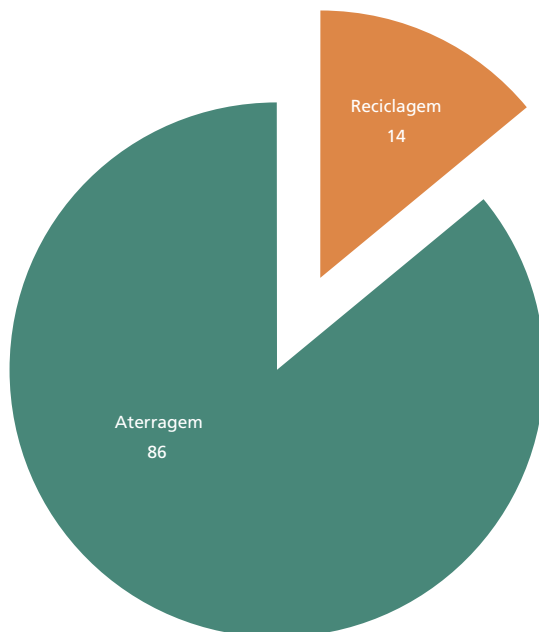
Os serviços de coleta convencional, coleta seletiva no perímetro urbano e a disposição final dos RSUs em aterro sanitário são geridos e operados pelo poder público municipal, abrangendo 100% do município. Desde 2013, por meio de um contrato de prestação de serviço, a coleta seletiva é operacionalizada pela Cooperativa de Reciclagem e Trabalho Ltda. (Coopert), cooperativa de catadores do município (Rutkowski, Lima e Oliveira, 2013). A Coopert, além da coleta, executa as atividades de triagem, beneficiamento primário (prensagem) e comercialização dos materiais.

9. É importante pontuar que os dados aqui apresentados são baseados em informações disponíveis sobre o sistema formal de coleta de resíduos dos municípios. Existe um desvio, principalmente para os casos brasileiros, relacionado principalmente à ação de catadores informais e à disposição inadequada dos resíduos por parte da população, resíduos estes que acabam por não passar pelo gerenciamento realizado pelo poder público.

GRÁFICO 1

Itaúna: composição graviométrica e destinação dos RSUs

(Em %)

1A – Composição graviométrica dos RSUs**1B – Destinação dos RSUs**

Elaboração dos autores.

O índice atual de coleta da Coopert é significativo, chegando a cerca de 20% do total dos resíduos coletados no município. Esse valor é consideravelmente alto em vista das médias nacionais, já que os programas oficiais de coleta seletiva são incipientes e, em sua maior parte, ineficazes (Cempre, 2013). O material coletado é triado e processado na cooperativa e, depois, comercializado para reciclagem. Do total coletado, a Coopert consegue um aproveitamento próximo a 70%. A cooperativa trabalha atualmente em sua capacidade máxima de produção, e sua estrutura se mostra insuficiente para a ampliação do aproveitamento de materiais secos. Um novo galpão está em fase de finalização das obras. Com isso, espera-se melhorar os índices gerais da coleta seletiva no município.

Em 1987 a gestão de RSUs em Itaúna era distinta da forma atual, seguindo o padrão das usinas de triagem de lixo comuns na época. As usinas processavam todo o lixo sem coleta seletiva. O material reciclável era segregado e comercializado, e o resíduo orgânico era transformado em adubo orgânico por meio de um processo artesanal análogo à compostagem. Posteriormente, identificou-se que o composto apresentava alta contaminação de metais pesados, o que inviabilizou a continuidade do processo (Itaúna, 2014). Atualmente, os demais resíduos, excluídos os materiais aproveitados pela Coopert, são enviados para aterramento no Aterro Sanitário Municipal, não existindo até o momento programa algum em execução para segregação ou tratamento diferenciado dos resíduos orgânicos. Existe pretensão, por parte do município, de investir em compostagem futuramente (Itaúna, 2014).

3.1.2 Londrina

Londrina é um município do estado do Paraná, localizado a 390 km da capital Curitiba, que tem uma população estimada de 537.566 habitantes (IBGE, 2013). A geração *per capita* anual de RSUs é de 336 kg por habitante/ano (Lima, 2006), e a geração total de RSUs é de aproximadamente 143.892 t/ano, sendo que, desse total, 131.304 t/ano são aterradas e 12.588 t/ano são recicladas.

Os RSUs provenientes da coleta convencional de Londrina são encaminhados para uma Central de Tratamento de Resíduos (CTR), onde são aterrados. A coleta e o transporte são operados por uma empresa contratada. A coleta seletiva existe no município desde 1996, e, a partir de 2001, os catadores foram incluídos no processo (Fundação Avina, 2012). O sistema de coleta seletiva passou por diversas configurações. Atualmente cinco cooperativas de catadores são contratadas pelo município para prestar o serviço de coleta seletiva, as quais abrangem 77% da cidade. As cooperativas, além da coleta, também executam as atividades de triagem, beneficiamento primário (prensagem) e comercialização dos materiais. O índice de coleta seletiva em Londrina é de aproximadamente 9% do total de resíduo coletado. O índice de rejeito da coleta, por sua vez, é de aproximadamente 20%. O poder público implantou um sistema de coleta dos resíduos orgânicos visando à compostagem, porém o processo está em fase de teste, com a implantação de um projeto-piloto.

A prefeitura municipal está elaborando um novo projeto de gestão de resíduos no município, denominado de Lixo Zero. Trata-se de um conjunto de leis, programas, técnicas, ações, métodos e tecnologias que objetivam conjuntamente coletar e destinar, de forma ambientalmente correta, socialmente justa e economicamente viável, 100% dos resíduos produzidos pelo município. O projeto tem como base a integração dos serviços de educação ambiental, limpeza urbana, coleta seletiva, coleta convencional, processamento dos materiais recicláveis, tratamento dos resíduos orgânicos e destinação final dos rejeitos. As principais metas são: a redução da geração, a reutilização, a reciclagem, a redução do volume de resíduos coletados e a redução do volume dos rejeitos destinados ao aterro sanitário.¹⁰

3.2 Estudo de casos internacionais

Gestão, gerenciamento integrado dos resíduos sólidos e sustentabilidade são temáticas já abordadas e com experiências práticas bem-sucedidas em São Francisco, Renânia-Palatinado e Estocolmo. No entanto, essas localidades estão em processo de otimização das rotas tecnológicas em conformidade com os pilares da sustentabilidade (ambiental, social e econômico) e com o propósito de alcançar os objetivos pressupostos no conceito de lixo zero (Zaman e Lehmann, 2011).

A legislação internacional relacionada a RSUs tem estruturas e princípios diferentes, notadamente quando se trata da União Europeia (UE), no caso da Renânia-Palatinado e Estocolmo, e dos Estados Unidos, especialmente São Francisco. Mesmo nos dois casos situados na UE, cada gestão pública tem o livre arbítrio de desenvolver o plano de ação e modelar a forma como as metas devem ser atingidas. Levando esses critérios em consideração, a situação observada por meio do levantamento global mostra que os três casos internacionais apresentaram planos de ação e filosofias distintas no que se refere ao conceito de lixo zero, conforme detalhado a seguir.

3.2.1 São Francisco

A cidade de São Francisco está localizada no estado da Califórnia nos Estados Unidos da América, sendo a capital financeira e administrativa deste estado. Abriga um total de 835.364 habitantes em uma área de 122 km² (UN Habitat, 2010). A geração *per capita* de RSUs é de 609 kg por habitante/ano, tendo uma geração total anual estimada de 502.951 t de resíduos (UN Habitat, 2010).

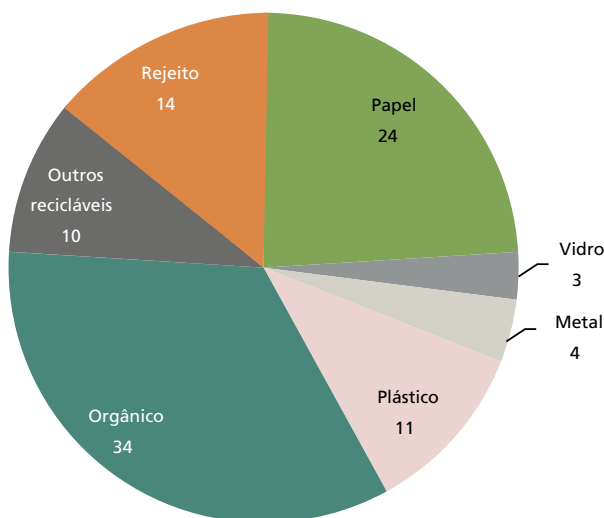
São Francisco tem atualmente uma das mais altas taxas de desvio de materiais, dando destino ambientalmente correto a cerca de 77% do total de resíduos produzidos no município (Allen *et al.*, 2012). O bem-sucedido programa da cidade

10. Disponível em: <http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/cmtu/conceito_projeto_lixo_zero.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2014.

baseia-se principalmente em: *i*) rigorosa legislação de redução de resíduos, com o banimento de sacolas plásticas e outras embalagens supérfluas, a obrigatoriedade de adesão à reciclagem e compostagem, o estabelecimento de metas, a responsabilidade estendida ao consumidor e produtor, entre outros; e *ii*) criação de uma cultura da reciclagem e da compostagem, por meio de incentivos (Allen *et al.*, 2012). Além de incentivar a reciclagem e a compostagem, São Francisco, com seu programa de lixo zero, fomenta a redução do consumismo de materiais e a maximização do desvio de materiais, bem como encoraja a reutilização, o conserto e o consumo sustentável (Zaman e Lehmann, 2013).

GRÁFICO 2

São Francisco: composição gravimétrica dos RSUs (total: 508.323,00 t)
(Em %)



Elaboração dos autores.

Estima-se que, do total de RSUs gerado em São Francisco, 52% são reciclados; 20%, compostados; e 28%, enviados ao aterramento (UN Habitat, 2010).

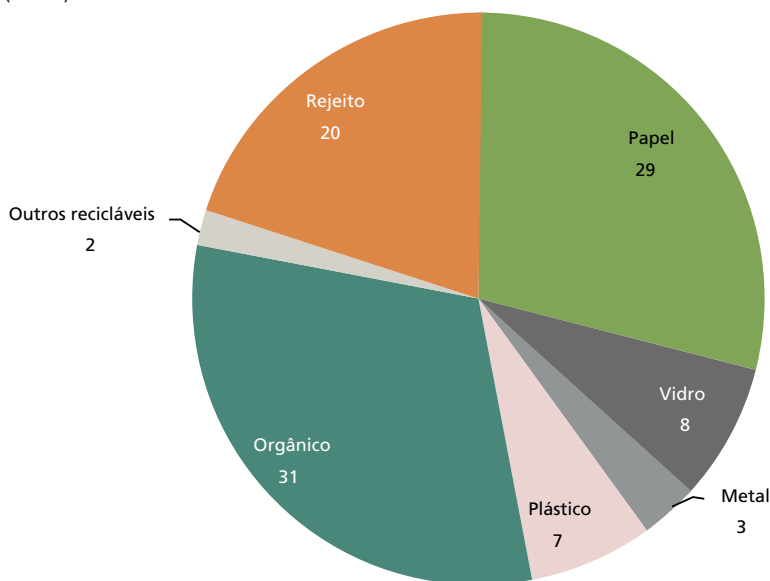
3.2.2 Estocolmo

Com uma população de aproximadamente 872 mil habitantes, a cidade de Estocolmo, capital da Suécia, gera em torno de 418.537 t de RSUs por ano (Stockholm, 2013). O modelo de classificação e quantificação de resíduos sólidos gerado é comparável com o da cidade de São Francisco, ou seja, papel, plástico, matéria orgânica, metal e vidro, conforme demonstra o gráfico 3.

GRÁFICO 3

Estocolmo: composição gravimétrica dos RSUs (total: 418.536,96 t)

(Em %)



Elaboração dos autores.

No âmbito europeu, Estocolmo apresenta um dos mais baixos índices de disposição final de RSUs em aterros sanitários, ou seja, a maior fração é tratada ou reaproveitada. Devido ao fato de a separação dos RSUs não ser um ato obrigatório até os dias atuais, Estocolmo mantém uma das rotas tecnológicas mais antigas: a incineração. Para manter essa rota viável e aceitável ambientalmente, o governo sueco estabelece rígidas leis de controle de emissões atmosféricas, adota tecnologias avançadas para tratamento dos gases de exaustão e se certifica de que a eletricidade e o calor produzidos sejam excedentes ao que a planta demanda no total. Até o momento, o governo sueco acredita que a produção de energia a partir de resíduos pode colaborar com a redução da dependência de recursos não renováveis para a geração de energia limpa – visto que aproximadamente 68% da matriz energética sueca são provenientes dos derivados de petróleo e nuclear (IEE, 2012). No entanto, por meio da planta de incineração e ciclo combinado *Högdalenverken*, em Estocolmo, eletricidade e gás para aquecimento são produzidos para abastecer em torno de 130 mil residências.¹¹

Com o propósito governamental de integração do setor de gestão de RSUs com o energético, a reciclagem é a rota tecnológica secundária até o presente momento. Porém, com a mudança dos hábitos influenciada pelas normas europeias (reduzir,

11. Essa informação foi obtida por meio de entrevista com o gerente da planta de incineração Niclas Åkerlund, em 2014.

reutilizar e reciclar), a gestão de RSUs encontra-se em fase transitória. Novas formas de coleta vêm sendo criadas e trabalhadas voluntariamente com a população, como um sistema de coleta de resíduos a vácuo. Neste sistema, a separação dos resíduos deve ser feita na origem, ou seja, pelo próprio morador. Em vez da coleta periódica porta a porta, o caminhão se dirige somente à central de coleta, uma vez que os resíduos são transportados separadamente por sucção até o estabelecimento. O objetivo do investimento nessa tecnologia é minimizar a circulação de caminhões em Estocolmo e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais ocasionados pela exaustão de gases tóxicos ocorrida nessa fase de coleta e transporte. A cidade pretende banir aterros sanitários, mas eles atualmente ainda são utilizados para a disposição de resíduos não inflamáveis e cinzas, que representam 9% do volume total de RSUs gerado.

3.2.3 Renânia-Palatinado

Situada no sudoeste da Alemanha, a região da Renânia-Palatinado é dividida em 24 distritos, com aproximadamente 3,9 milhões de habitantes. Por abranger municípios e vilarejos de pequeno e médio porte, com uma variação de 45 a 200 mil habitantes, as prefeituras consorciaram-se em um sistema de gestão integrada dos resíduos sólidos.

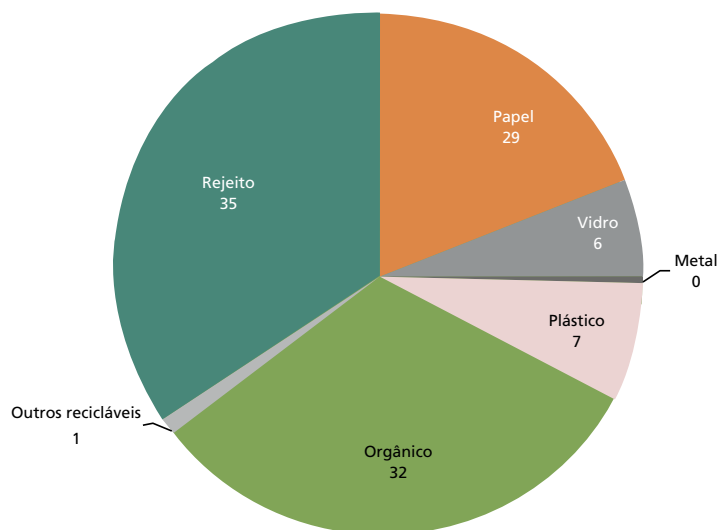
A Renânia-Palatinado, como várias outras regiões da Alemanha, já alcançou um dos objetivos do lixo zero, ou seja, banir a disposição de RSUs em aterros sanitários. Para isso, adotou um regime político rígido no qual cada habitante é, de certa forma, considerado uma fonte de poluição. O modelo “poluidor-pagador” adotado pela região faz com que os habitantes paguem pelo volume individual de RSUs gerado de acordo com a composição gravimétrica local (gráfico 4). A base do sistema é motivar a separação na origem, sendo determinada a separação dos resíduos em seis coletores disponibilizados para papel, embalagens plásticas, matéria orgânica, resíduos perigosos (pilhas, baterias), metal, vidro e material misto (embalagens plásticas de produtos químicos de limpeza, ou qualquer outra embalagem plástica ou metálica sem o selo verde, restos alimentares, resíduos de banheiro e outros). Cada cidadão e organização deve seguir rigorosamente essa classificação dos RSUs para que possa encaminhá-los de maneira correta, seja para reuso, seja para reciclagem, seja para aproveitamento energético, já que os aterros sanitários foram banidos desde 2005.

Entre várias rotas tecnológicas, a reciclagem vem sendo tratada como prioridade atualmente (gráfico 5). Parcerias entre municípios, comércio e indústrias de reciclagem fazem com que embalagens de bebidas (plásticas e metálicas) sejam retornáveis por meio de selos com valores comerciais. Depois da adoção desse sistema, a importação e a dependência de novas fontes de matéria-prima (como polímeros sintéticos derivados do petróleo para a fabricação do plástico) vêm diminuindo, trazendo vantagens econômicas e ambientais.

GRÁFICO 4

Renânia-Palatinado: composição gravimétrica dos RSUs (total: 1.836.791,00 t)

(Em %)

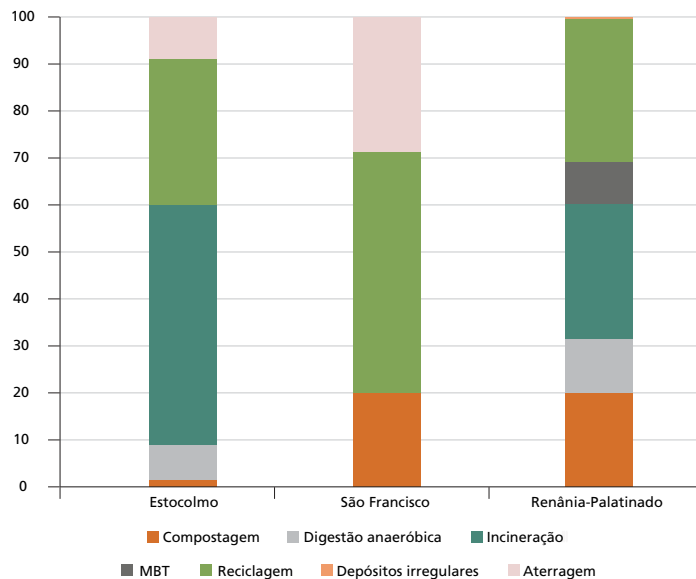


Elaboração dos autores.

GRÁFICO 5

Estocolmo, São Francisco e Renânia-Palatinado: rotas tecnológicas¹

(Em %)



Elaboração dos autores.

Nota: ¹ Tratamento mecânico e biológico (*mechanical biological treatment* – MBT): trata-se da conjugação entre a triagem dos resíduos (*mechanical*) e o tratamento biológico destes, grande parte das vezes, a partir da biodigestão anaeróbica (*biological*).

Após a reciclagem, o reaproveitamento da matéria orgânica é fundamental para a governança local em direção ao lixo zero. Por se tratar de uma região e não de um único município, a localização de cada tecnologia de tratamento é estratégica para reduzir custos operacionais. As plantas de digestão anaeróbica e compostagens são localizadas próximas a áreas de cultivo agrícola, que absorvem o fertilizante produzido. Estima-se que aproximadamente 37.132 MWh de eletricidade, 29.470 MWh de calor e 65 mil toneladas de fertilizante sejam gerados anualmente.

O que se pode observar do modelo adotado na Renânia-Palatinado são os resultados obtidos pela governança e pelo sistema de gestão em longo prazo. A transformação de 100% de RSUs em produtos, o aproveitamento energético e a não utilização de aterros sanitários demonstram que o primeiro ciclo de evolução da gestão de RSUs foi alcançado.

Uma iniciativa pioneira foi lançada na Alemanha para que todos os estados membros elaborem um novo plano de ação: redução de emissões de GEEs, ampliação da eficiência e otimização de qualquer atividade realizada pelo setor público. A meta para 2050 é a redução de 80% das emissões em comparação com 1990 (Rheinland Pfalz, 2012a). Para enfrentar essa situação, a gestão de RSUs está sendo reavaliada. Por fim, existe uma nova diretriz, fixada pelo governo local na Renânia-Palatinado, que estabelece que a reciclagem dos resíduos mistos (maior fração da composição gravimétrica, conforme descrito no gráfico 3) deve ser ampliada. Até o momento, 20% dos resíduos mistos são reciclados, e a maior parte é incinerada (Rheinland Pfalz, 2012b).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os indicadores levantados para cada experiência investigada, segundo os aspectos considerados na metodologia (ambientais, sociais e econômicos). Para os indicadores cuja coleta de dados não foi possível, foram utilizadas bases estabelecidas em diferentes fontes bibliográficas.

4.1 Aspectos ambientais

A taxa de desvio de materiais do aterramento e da incineração foi calculada para cada uma das experiências, bem como o ZWI. Além desses, outros indicadores ambientais também são calculados e apresentados a seguir. Os valores de referência para transformação das unidades ambientais são apresentados na tabela 1.

TABELA 1

Rotas tecnológicas: valores-referências para cálculo dos aspectos ambientais

Tecnologia de gerenciamento do resíduo	Categoria do resíduo	Eficiência de substituição de recursos naturais virgens (t/t)	Eficiência de substituição energética (GJ _{LHV} /t)	Redução de GEE (CO ₂ e/t)	Economia de água (kl/t)
Reciclagem	Papel	0,92	8,54	1,90	2,91
	Vidro	0,95	6,50	0,40	2,30
	Metal	0,88	113,76	9,60	93,87
	Plástico	0,94	51,45	1,42	-11,37
	Outros	0,35	10,00	1,15	6,00
Compostagem	Orgânico	0,63	0,33	0,50	0,44
Biodigestão anaeróbica ¹	Orgânico	0,64	1,68	1,15	0,26
Incineração	Resíduo misturado	0,00	1,98	0,34	0,00
Aterramento	Resíduo misturado	0,00	0,42	0,39	0,00

Fonte: Verma (2002) e Zaman e Lehmann (2013).

Elaboração dos autores.

Nota: ¹ Para biodigestão anaeróbica, considerou-se como valor-referência a geração de 53,8% de composto orgânico do volume total de resíduos tratados (t/t) e a geração de biogás equivalente a 50 l de petróleo por tonelada de RSUs. O composto digerido, subproduto da tecnologia de DA, foi computado para as economias, uma vez que os municípios em questão fazem uso dele para adubagem, correção de solo e fertilização.

Obs.: GJ significa gigajoule; LHV, *lower heating value*, ou seja, GJ_{LHV} indica gigajoule (na base LHV) por tonelada; CO₂e/t significa CO₂ equivalente por tonelada; Kl/t, quilolitro por tonelada; e DA significa digestão anaeróbica.

4.1.1 Itaúna

A taxa de desvio de materiais do aterro em Itaúna foi de 14%. O ZWI calculado foi de 0,12, indicando que 12% dos recursos naturais empregados para a produção total de resíduo gerado são recuperados pelo sistema de gerenciamento.

A reciclagem em Itaúna ainda substitui 86.351 GJ de energia, o equivalente a 23.986.408 kWh. São 263 kWh por habitante economizados por ano. O sistema de gestão de resíduos no município ainda reduz a emissão de GEEs em um total de 14.697 t de CO₂e/ano, representando uma redução de 161 kg de CO₂e por habitante/ano. Há ainda uma economia de recursos hídricos, totalizando 23.947 kl/ano de água economizada, o equivalente a 262 l por habitante/ano.

4.1.2 Londrina

A taxa de desvio de materiais do aterro em Londrina foi de 8%. O ZWI calculado foi de 0,07, indicando que 7% dos recursos naturais empregados para a produção total de resíduo gerado são recuperados pelo sistema de gerenciamento.

A reciclagem em Londrina ainda substitui 521.338 GJ/ano de energia, o equivalente a 144.816.102 kWh/ano. São 269 kWh por habitante economizados por ano. O sistema de gestão de resíduos em Londrina reduz a emissão de GEEs em um total de 86.430 t de CO₂e/ano, representando uma redução

de 161 kg de CO₂e por habitante/ano. Há ainda uma economia de recursos hídricos, totalizando 178.624 kl/ano de água economizada, o equivalente a 332 l por habitante/ano.

4.1.3 São Francisco

A taxa de desvio de materiais do aterro em São Francisco foi de 72%. O ZWI calculado foi de 0,55, indicando que 55% dos recursos naturais empregados para a produção total de resíduo gerado são recuperados pelo sistema de gerenciamento.

O SIGRSU em São Francisco ainda substitui 6.931.671 GJ/ano de energia, o equivalente a 1.925.464.080 kWh/ano. São 2.331 kWh por habitante economizados por ano. O sistema de gestão de resíduos em São Francisco ainda reduz a emissão de GEEs em um total de 677.010 t de CO₂e/ano, representando uma redução de 820 kg de CO₂e por habitante/ano. Há ainda uma economia de recursos hídricos, totalizando 2.012.705 kl/ano de água economizada, o equivalente a 2.437 l por habitante/ano.

4.1.4 Estocolmo

A taxa de desvio de materiais do aterro em Estocolmo foi de 95%. O ZWI calculado foi de 0,34, indicando que 34% dos recursos naturais empregados para a produção total de resíduo gerado são recuperados pelo sistema de gerenciamento.

O SIGRSU em Estocolmo ainda substitui 3.608.746 GJ/ano de energia, o equivalente a 1.002.429.396 kWh/ano. São 1.150 kWh por habitante economizados por ano. O sistema de gestão de resíduos em Estocolmo ainda reduz a emissão de GEEs em um total de 408.759 t de CO₂e/ano, representando uma redução de 469 kg de CO₂e por habitante/ano. Há ainda uma economia de recursos hídricos, totalizando 1.267.271 kl/ano de água economizada, o equivalente a 1.453 l por habitante/ano.

4.1.5 Renânia-Palatinado

A taxa de desvio de materiais do aterro na Renânia-Palatinado foi de 100%.¹² O ZWI calculado foi de 0,54, indicando que 54% dos recursos naturais empregados para a produção total de resíduo gerado são recuperados pelo sistema de gerenciamento.

O SIGRSU na Renânia-Palatinado ainda substitui 12.871.563 GJ/ano de energia, o equivalente a 3.575.434.054 kWh/ano. São 917 kWh por habitante economizados por ano. O sistema de gestão de resíduos na Renânia-Palatinado ainda reduz a emissão de GEEs em um total de 1.574.316 t de CO₂e/ano, representando

12. Segundo referências pesquisadas, as cinzas obtidas na incineração dos resíduos na Renânia-Palatinado são utilizadas na produção de sub-base asfáltica. Sendo assim, não existem aterros nessa região, e a taxa de desvio de materiais do aterramento é de 100%.

uma redução de 404 kg de CO₂e por habitante/ano. Há ainda uma economia de recursos hídricos, totalizando 686.910 kl/ano de água economizada, o equivalente a 176 l por habitante/ano.

A tabela 2 resume os resultados encontrados para os aspectos ambientais analisados.

TABELA 2

Rotas tecnológicas: cálculo dos indicadores de aspectos ambientais

Indicadores de aspectos ambientais						
Cidade/região	Substituição de recursos naturais virgens (kg por habitante/ano)	Energia total substituída (kWh por habitante/ano)	Redução total de GEEs (kg de CO ₂ e por habitante/ano)	Economia total de água (l por habitante/ano)	Taxa de desvio de aterramento (%)	ZWI
Itaúna	31	266	163	266	14	0,12
Londrina	20	276	163	346	9	0,08
São Francisco	337	2.331	820	2.437	72	0,55
Estocolmo	164	1.150	469	1.453	95	0,34
Renânia-Palatinado	237	917	404	176	100	0,54

Elaboração dos autores.

Algumas considerações podem ser inferidas a partir da exploração dos casos apresentados.

- 1) A utilização massiva da incineração e do aterramento como solução para o lixo tende a prejudicar os resultados ambientais dos SIGRSUs. Por exemplo, apesar de ter um bom índice de reciclagem (superior a 30%), Estocolmo possui baixos números referentes à substituição de matéria virgem, principalmente se comparados aos de São Francisco. Isso se deve ao fato de Estocolmo utilizar intensivamente a incineração como tecnologia de gestão de RSUs, ao passo que São Francisco não adota esta alternativa em seu sistema.
- 2) O ZWI é o instrumento utilizado aqui para avaliar a eficiência dos diferentes SIGRSUs, pois manifesta a eficiência do sistema em relação à substituição de recursos naturais virgens para a produção de bens de consumo. Uma elevada taxa de aterramento ou incineração não garante ao sistema bons resultados em relação ao ZWI, uma vez que o resíduo perde sua utilidade quando empregadas essas tecnologias. Além de recursos naturais, é possível pensar também na perda de trabalho objetivado acumulado para a produção dos materiais encontrados no resíduo, nos processos de transformação primária. Alternativas de reaproveitamento mantêm em certo nível as características físicas e a natureza orgânica dos resíduos, representando vantagem em relação à sustentabilidade ambiental.

- 3) Apesar de apresentar algum nível de substituição energética, a incineração depende do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos para alcançar tal vantagem. O PCI dos RSUs é o resultado das contribuições dos poderes caloríficos específicos de cada material, que revela a capacidade de combustão dos materiais. O PCI dos RSUs brasileiro é de cerca de 1.980 kcal/kg. Uma redução (ou desvio) de, por exemplo, 27% dos plásticos dos RSUs abaixa o PCI para 1.680 kcal/kg, o que é considerado o limite inferior para queima autossustentada de um incinerador (Via Pública, 2012). Abaixo desse valor seria necessário prover a adição de combustíveis fósseis, o que representa desvantagem tanto em relação a aspectos ambientais quanto a aspectos econômicos. O avanço da reciclagem conforme premissas sustentadas pela PNRS tende a diminuir gradativamente o PCI dos RSUs (a partir do desvio dos materiais recicláveis), tornando cada vez mais insustentável a solução da incineração. Em países em que a reciclagem é bem desenvolvida, como Alemanha e Suécia, a operação de incineradores é garantida pela importação de resíduos não segregados de países vizinhos, principalmente da Europa Oriental, como Bulgária, República Tcheca e Romênia, e de outros, como a Itália. A adoção dessa tecnologia tende, por conseguinte, a ser uma ameaça para o aumento dos índices de reciclagem.
- 4) A incineração de resíduos apresenta baixo aproveitamento na produção de energia elétrica em relação à totalidade dos resíduos utilizados, recuperando apenas entre 7% e 15% do total de calor liberado (Negrão e Almeida, 2010). Quando se trata de produção de energia térmica, o aproveitamento da incineração é alto, porém só se justifica em países que têm, na maior parte do ano, temperaturas abaixo ou próximas de zero e que, por conseguinte, são extremamente dependentes da utilização de aquecedores residenciais.
- 5) A reciclagem é de fato a alternativa tecnológica que representa maiores vantagens do ponto de vista ambiental. Uma rota tecnológica que vise à sustentabilidade ambiental deve priorizar a reciclagem como tecnologia.

4.2 Aspectos sociais

Os aspectos sociais de cada caso analisado também foram mensurados. O modelo brasileiro, de cooperativismo/associativismo popular, tem se mostrado uma excelente alternativa para a geração de trabalho e renda e para a inclusão socioprodutiva de catadores de lixo, catadores de rua, pessoas em frágil situação social (ex-detentos, por exemplo), com baixa escolaridade, baixa capacitação técnica, desempregados e pessoas idosas e com perda funcional (Crivellari, Dias e Pena, 2008). Esse modelo assegura uma das premissas incluídas na PNRS, de que o resíduo deve ser enxergado como bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda, e promotor de cidadania.

Nos casos brasileiros analisados, foi possível observar um montante significativo de pessoas trabalhando na gestão de resíduos, principalmente nas cooperativas de catadores. Em Itaúna, um total de 144 postos de trabalho é gerado pelo sistema de gestão de resíduos. Em Londrina, são 478 postos. Em ambos os casos, observa-se a presença de pessoas com vulnerabilidade social, o que atesta a enorme capacidade de inclusão socioprodutiva dessa tecnologia social.¹³ Há ainda os outros empregos gerados ao longo da cadeia produtiva da reciclagem que não estão nessa conta, mas que são numerosos.

Em São Francisco há também alto índice de geração de empregos, principalmente devido à rota tecnológica escolhida para o SIGRSU, que está centrada na reutilização e na reciclagem. O município emprega cerca de 2 mil pessoas somente com suas iniciativas de reciclagem (incluindo aqui a reciclagem de resíduos de construção civil e demolição). Mais cerca de 150 pessoas são empregadas em outras tecnologias, principalmente na compostagem (por volta de cem trabalhadores). A biodigestão anaeróbica, o aterramento e outras tecnologias utilizadas (como o aproveitamento energético de biomassa), por sua vez, geram menos postos de trabalho nessa cidade.

Apesar da grande quantidade de empregos gerados, foi relatado por um representante da Prefeitura de São Francisco no *Workshop* Internacional Lixo Zero que, depois da crise mundial de 2008, vem crescendo o número de pessoas que sobrevivem da catação informal nas ruas. Os sistemas formais de gerenciamento de resíduos do município não conseguem absorver essa mão de obra excedente gerada pela crise, o que evidencia uma dificuldade de inclusão socioprodutiva do sistema.

Para Estocolmo e Renânia-Palatinado, não foram coletados dados sobre geração de emprego. Nos dois casos, existe uma massiva automatização em todo o SIGRSU, devido a características específicas do contexto dessas duas localidades, como o alto custo da mão de obra e o baixo índice de desemprego. Não foram, portanto, considerados dados empíricos destes casos.

Para fins de comparação entre as tecnologias, além dos dados já apresentados, utilizamos um levantamento que nos fornece o número de postos de trabalho gerados por cada tecnologia de gestão de resíduos, o qual se baseia em um levantamento feito em diversos municípios dos Estados Unidos. É possível notar que as iniciativas de reutilização e reciclagem são as que mais geram trabalho. Baseado nas experiências de Itaúna e Londrina, estimamos também a capacidade de geração de trabalho do cooperativismo/associativismo popular, principalmente por meio das organizações de catadores (tabela 3).

13. A "tecnologia social compreende produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas na interação com a comunidade e que represente efetivas soluções de transformação social". Disponível em: <<http://rts.ibict.br/rts/tecnologia-social/tecnologia-social>>.

TABELA 3
Número de postos de trabalho por 10 mil toneladas/ano processadas para cada tecnologia de gestão de RSUs

Tecnologia de gestão de RSUs	Número de postos de trabalho por 10 mil toneladas/ano
Reutilização	
Reutilização de computadores	296
Recuperação de tecidos	85
Reutilização de bens duráveis diversos	62
Reparo de <i>pallets</i> de madeira	28
Reciclagem	
Indústria da reciclagem	25
Indústria de papel	18
Indústria de produtos de vidro	26
Indústria de produtos de plástico	93
Instalações de recuperação de materiais (centrais de triagem)	10
Cooperativas/associações de reciclagem (modelo brasileiro)	337
Compostagem	4
Aterro sanitário e incineração	1

Fonte: Friends of the Earth, Report: More jobs, less waste, 2010. Disponível em: <http://www.foe.co.uk/sites/default/files/downloads/jobs_recycling.pdf>.

Elaboração dos autores.

O indicador Potencial de Educação e Desenvolvimento de uma Cultura Ambiental foi analisado qualitativamente de acordo com as tecnologias utilizadas. Baseando-se nessa análise, é possível tecer algumas considerações a partir do relacionamento dos indivíduos com o resíduo que cada tecnologia demanda, que são apresentadas no quadro 1.

QUADRO 1
Potencial de Educação e Desenvolvimento de uma Cultura Ambiental das tecnologias de gestão de RSUs

Tecnologia de gestão de RSUs	Potencial de Educação e Desenvolvimento de uma Cultura Ambiental
Reciclagem mais cooperativas de catadores	Muito alto. Os catadores de materiais recicláveis são excelentes agentes mobilizadores e de educação ambiental, pelo relacionamento prático que têm com o resíduo e com a população. Nos dois casos brasileiros explorados neste trabalho, os catadores exercem algum tipo de ação de mobilização e educação ambiental, o que é determinante para o avanço dos programas de coleta seletiva nessas localidades.
Reciclagem mais outros modelos	Alto. A reciclagem por si só é uma tecnologia que demanda um bom nível de separação dos resíduos. Por conseguinte, é uma tecnologia que tende a exigir desenvolvimento e educação ambiental. É uma tecnologia, porém, que se sustenta também sem essa cultura amplamente desenvolvida. Por exemplo, atualmente, no Brasil, a reciclagem alcança níveis significativos graças principalmente à atuação dos catadores informais (de lixão e de rua).

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia de gestão de RSUs	Potencial de Educação e Desenvolvimento de uma Cultura Ambiental
Compostagem	Muito alto. A compostagem é uma tecnologia que demanda elevado nível de separação do resíduo orgânico na fonte. A qualidade do composto a ser gerado depende sensivelmente dessa separação. A opção da compostagem caseira, principalmente, tende a ser uma tecnologia fomentadora da criação de uma nova percepção sobre o resíduo. O próprio usuário experiencia todo o processo de transformação do resíduo orgânico em composto, do lixo em produto. Essa alternativa é usada de forma exitosa em alguns lugares no mundo. No Brasil, a cidade de São Paulo tem atualmente um piloto para esse modelo. A compostagem de larga escala também necessita de nível elevado de separação, porém pode ser executada utilizando-se apenas resíduos de grandes geradores.
Biodigestão anaeróbica	Alto. A tecnologia da biodigestão anaeróbica não necessita de uma separação na fonte tão rigorosa. Podem ser construídas centrais de triagem (inclusive mecanizadas) para retirar materiais não orgânicos. A existência de um forte programa de coleta seletiva e elevado nível de separação na fonte, porém, tende a diminuir os custos de investimento e de operação dessa tecnologia (Via Pública, 2012). Dessa maneira, é possível afirmar que a biodigestão anaeróbica tem alto potencial de contribuir para a educação e o desenvolvimento de uma cultura ambiental.
Aterramento	Nulo. O aterramento é a forma de disposição final do resíduo mais utilizada no mundo, principalmente nos países em desenvolvimento (Minas Gerais, 2012). Não necessitando de qualquer separação na fonte, não é capaz de contribuição para uma mudança de percepção em relação ao resíduo na sociedade.
Incineração	Nulo. Assim como o aterramento, a incineração do resíduo não depende de separação do resíduo na fonte para funcionamento. A tecnologia da incineração não tem o potencial de contribuir para a educação e a formação de uma cultura ambiental, podendo ser considerada um inibidor a essa formação.

Elaboração dos autores.

4.3 Aspectos econômicos

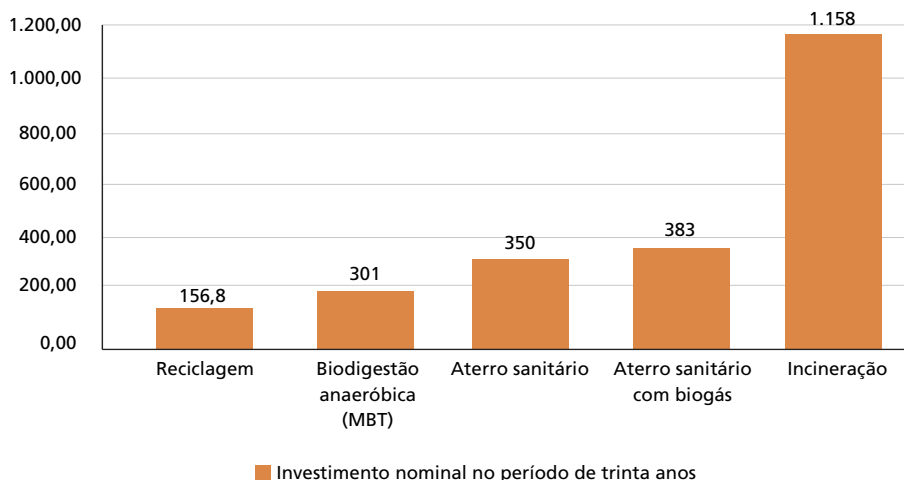
Em relação aos aspectos econômicos, nos casos nacionais, foram obtidas informações acerca do custo dos SIGRSUs dos municípios, principalmente aqueles custos relacionados à prestação de serviço de coleta seletiva, triagem, beneficiamento primário e comercialização dos resíduos recicláveis por parte das cooperativas. Em Itaúna, o custo anual do SIGRSU é de cerca de R\$ 4,8 milhões, sendo que aproximadamente 30% desse valor é alocado para operação da iniciativa de reciclagem executada em parceria com a cooperativa de catadores, e o restante é destinado a coleta do resíduo não reciclável, varrição, capina, poda, aterramento e outros serviços de limpeza pública. O custo do SIGRSU é de R\$ 216/t.

Com a municipalização do serviço de limpeza urbana, e principalmente com a contratação da Coopert, Itaúna tem gastado praticamente a metade do valor que era gasto anteriormente, quando todo o SIGRSU era executado pela iniciativa privada, além de ter melhorado a eficiência do sistema.

Em Londrina, as atividades de coleta seletiva, triagem, beneficiamento primário e comercialização dos materiais recicláveis também são executadas por cooperativas de catadores. O custo anual desses serviços para os cofres públicos é de R\$ 7.522.588,80. O custo total anual do SIGRSU no município é de R\$ 11.978.818,44, o que representa um custo de R\$ 83,25/t.

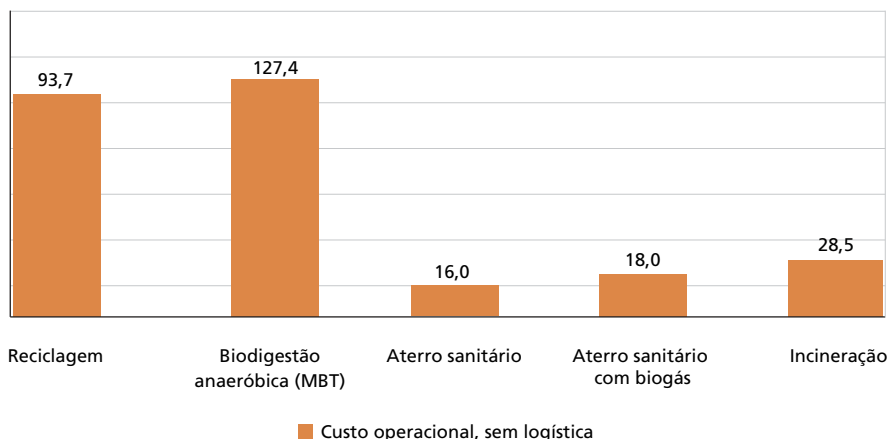
Para os casos internacionais, preferiu-se não incluir dados sobre o custo das experiências por dois motivos: *i)* não foi possível obter todos os dados necessários; e *ii)* não seria boa fonte para comparação, tendo em vista que o custo das tecnologias varia muito em relação às escolhas adotadas dentro das próprias opções tecnológicas, como a utilização ou não de automação no processo de reciclagem, a utilização de sistemas a vácuo para coleta seletiva, entre outros. Sendo assim, com o objetivo de munir nossa análise com informações econômicas, foram utilizados valores de referência, retirados de fontes bibliográficas (Via Pública, 2012; Minas Gerais, 2012), que estimam os custos de investimento e de operação para diferentes tecnologias. Os valores foram baseados em instalações para processamento de uma mesma quantidade de resíduos, para um período de trinta anos, e estão apresentados nos gráficos 6 e 7. O Capex está apresentado na escala de milhões de reais, enquanto os valores do Opex estão apresentados em custo por tonelada.

GRÁFICO 6
Capex por alternativas tecnológicas
(Em R\$ milhão)



Elaboração dos autores.

GRÁFICO 7
Opex por alternativas tecnológicas
(Em R\$/t)



Elaboração dos autores.

4.4 Análise qualitativa Swot: pontos fortes, pontos fracos, ameaças e oportunidades para o contexto brasileiro

A partir das considerações feitas, foi realizada uma análise qualitativa com o auxílio da ferramenta Swot. Para isso, consideraram-se cenários em que a reciclagem aparece como alternativa tecnológica prioritária, dadas as diretrizes da PNRS e a evidencição dos benefícios ambientais, sociais e econômicos que apresenta. A partir da reciclagem houve variação de outras tecnologias, que hipoteticamente poderiam compor com ela uma rota em conjunto, e, para cada combinação, pontuaram-se os pontos fortes, os pontos fracos, as ameaças e as oportunidades. Toda a análise foi realizada considerando os aspectos ambientais, sociais e econômicos explorados anteriormente. Os resultados são apresentados no quadro 2.

QUADRO 2
Análise Swot

Tecnologia de gestão de RSUs	Pontos fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Reciclagem mais compostagem	● alta eficiência de substituição de recursos naturais virgens; ● alta eficiência de substituição energética; ● alta eficiência de redução de GEEs; ● alta eficiência para economia de água; ● produção de composto orgânico, que é uma ótima alternativa para adubação, fertilização e correção do solo; ● a reciclagem tem enorme capacidade de geração de trabalho, principalmente se aproveitado o modelo brasileiro de cooperativismo popular e coleta seletiva solidária, que ainda apresenta a vantagem de promover inclusão socioproductiva de catadores de lixo, catadores de rua, pessoas em frágil situação social (ex-detentos, por exemplo), com baixa escolaridade, baixa capacitação técnica, desempregados e pessoas idosas e com perda funcional; ● o potencial de educação e formação de uma cultura ambiental da reciclagem é elevado; e ● possibilidade de economias por parte dos municípios para operação da coleta seletiva diferenciada de materiais secos, orgânicos e rejeitos com parceria com cooperativas de catadores.	● solução de médio a longo prazo: a alternativa da reciclagem e a compostagem necessitam de mais tempo para amadurecer, e outras soluções para o resíduo devem ser adotadas nesse meio tempo, como o aterramento; ● a compostagem necessita de uma separação na fonte refinada da fração orgânica, o que é difícil de conseguir, especialmente para o resíduo doméstico; e ● necessidade de maiores áreas para implantação dos pátios de compostagem (em comparação com outros sistemas).	● o mercado da reciclagem ainda tem enorme potencial de ampliação no Brasil, principalmente com as novas exigências da logística reversa; ● tanto a reciclagem da fração seca quanto a compostagem aparecem como alternativa prioritária na hierarquização tecnológica da PNRS; ● o tratamento do resíduo orgânico pela compostagem gera composto de alta qualidade, sendo uma excelente alternativa para adubação orgânica, principalmente para produção de alimentos, influenciando, assim, positivamente na segurança alimentar; ● a potencialização do mercado da reciclagem e o desenvolvimento do mercado de compostos orgânicos fomentariam a criação de inúmeros postos de trabalho, por intermédio da criação de oportunidades de desenvolvimento econômico no campo e na cidade, como a compostagem regionalizada (campo) e as organizações de catadores (cidade); e ● inclusão socioproductiva de população em situação de vulnerabilidade social, como catadores de lixo, catadores de rua, desempregados, entre outros.	● por ser uma solução que depende de mais tempo para se efetivar, pode ser preterida devido à urgência legal de fechamento dos livros e à escassez de recursos técnicos e financeiros dos gestores municipais para tratar o lixo de forma ambientalmente correta; e ● por depender de uma boa separação na fonte, a contaminação do resíduo orgânico pode ser uma ameaça à qualidade do composto a ser produzido.

(Continua)

(Continuação)				
Tecnologia de gestão de RSUs	Pontos fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Reciclagem mais biodigestão anaeróbica e MBT	● alta eficiência de substituição de recursos naturais virgens; ● alta eficiência de substituição energética; ● alta eficiência de redução de GEEs; ● alta eficiência para economia de água; ● produção de biogás: alternativa sustentável de fonte combustível; ● produção de composto orgânico, que é uma ótima alternativa para adubação, fertilização e correção do solo; ● capacidade de geração de energia elétrica ou de biogás; ● sistemas compactos para o tratamento dos resíduos orgânicos; e ● balanço energético positivo.	● solução de médio prazo: a alternativa da reciclagem combinada com a biodigestão anaeróbica necessita tempo para amadurecer, e outras soluções para o resíduo devem ser adotadas nesse meio tempo, como o aterramento; ● a biodigestão anaeróbica, se adotada sem um bom programa de coleta seletiva, tende a ter elevados custos de implementação e operação; e ● geração de efluentes líquidos com necessidade de tratamento (em menor volume do que em aterros, mas deve ser considerada).	● modularidade: se apresenta como uma boa solução para implantação em pequena, média e grande escala; ● a separação na fonte e um bom programa de coleta seletiva tendem a reduzir os custos de investimento e de operação dessa tecnologia. A biodigestão, assim como a compostagem, afeta positivamente a reciclagem, atuando como um bom incentivador para o desenvolvimento da coleta seletiva; ● possibilidade de geração de energia ou de aproveitamento do biogás como combustível; e ● oportunidade no mercado de créditos de carbono.	● como a compostagem, por ser uma solução que depende de mais tempo para se efetivar, pode ser preterida devido à urgência legal de fechamento dos lixões e à escassez de recursos técnicos e financeiros dos gestores municipais para tratar o lixo de forma ambientalmente correta; e ● uma má separação na fonte pode ser uma ameaça no sentido de um aumento exagerado nos custos de operação, o que poderia inviabilizar a solução.

(Continua)

(Continuação)	Tecnologia de gestão de RSUs	Pontos fortes ● grande capacidade de redução massica do resíduo pela incineração; ● baixo custo de operação (Opex); e ● capacidade de geração de energia elétrica.	Pontos fracos ● a incineração necessita de leis rígidas e rigorosa fiscalização para controle e manutenção, de modo a evitar que GEEs sejam emitidos; ● a incineração necessita de abastecimento contínuo de grande quantidade de RSUs de alto PCI para garantir o funcionamento; ● baixa geração de trabalho e renda; ● baixa capacidade de inclusão socioproductiva; ● baixo potencial de contribuição para a educação e o desenvolvimento de uma cultura ambiental; ● altíssimo custo de investimento; ● geração de efluentes líquidos e gasosos com alto grau de contaminantes; e ● necessidade de aterros classe I para os resíduos do incinerador ou processo para produção de subprodutos a partir das cinzas.	Oportunidades ● apresenta-se como alternativa rápida e de curto prazo à eliminação dos lixões de céu aberto e ao aterramento.	Ameaças ● desfavorece a redução e a reciclagem dos RSUs devido à demanda de grande quantidade de resíduo de alto PCI para tomar viável (contrariando assim a hierarquização tecnológica da PNRS); ● caso não haja rigorosa fiscalização e controle de emissões, pode se tornar alternativa extremamente poluente; ● efeito Nimby;¹ ● por depender de resíduos com alto PCI, pode comprometer o trabalho e a renda de empreendimentos e pessoas que sobrevivem da reciclagem, principalmente dos catadores; ● compromete a inclusão socioproductiva de pessoas em situação de vulnerabilidade social que dependem atualmente dos resíduos recicláveis (principalmente catadores de lixo e de rua); ● dada a composição do RSU brasileiro, a possibilidade da eficiência energética de um incinerador ser nula ou negativa é alta – nesse cenário, necessitaria de mais energia do que produz, o que significa a adição de combustíveis fósseis além do resíduo; ● alto custo de investimento necessário para um incinerador; ● elevado risco de contaminação no caso de falha do sistema de tratamento dos gases; e ● geração de efluentes constantes da listagem dos POPs.²
Reciclagem mais incineração					

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia de gestão de RSUs	Pontos fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Reciclagem mais aterro sanitário (com ou sem aproveitamento do biogás)	• o aterro sanitário apresenta baixo custo de operação (Opex); • pode receber qualquer tipo de resíduo não perigoso, sendo uma solução fácil de ser implementada; • aterro com aproveitamento de biogás: capacidade de geração de energia elétrica ou biogás; e • sistema de menor risco ambiental na operação.	• necessita de enormes áreas imobilizadas para construção do aterro; • ao enterrar todo o RSU, desperdiça todo o valor que poderia ser retirado do resíduo; • de acordo com a PNRS, deve ser a solução adotada apenas para o rejeito¹; e • uma má operação do aterro sanitário pode retroceder a instalação e chegar a transformá-la em uma espécie de aterro controlado ou lixão a céu aberto, tornando-o ambientalmente inadequado.	• aterro com aproveitamento de biogás: é uma boa alternativa para gerar energia a nível local, sustentar a própria instalação, ou utilizar o biogás como combustível; e • apresenta-se como alternativa rápida e de curto prazo à eliminação dos lixões de céu aberto e ao aterramento ambientalmente inadequado.	• é uma alternativa que, segundo a PNRS, deve ser gradativamente diminuída, destinando-se apenas ao tratamento do rejeito; e • efeito Nimby.

Elaboração dos autores.

Notas: ¹ Eleito Nimby (*not in my back yard*): individualmente as pessoas podem aceitar uma tecnologia como necessária, mas a comunidade não aceita que sejam instaladas em seus “quintais”. Isso torna a solução do problema do lixo mais complexa. A resistência social à implantação de novos aterros, já condenados do ponto de vista técnico e social, favorece a implantação de incineradores desde que os impactos ambientais (gases tóxicos, odores, cinzas) sejam rigorosamente controlados, mas próximo de quem eles serão instalados?

² Poluentes orgânicos persistentes (*persitant organic pollutants* – POPs) é o nome que foi atribuído pelo United States Environmental Programme para descrever um tipo de poluente caracterizado por ser altamente tóxico, por permanecer no ambiente por muito tempo, por ser bioacumulativo (acumula-se em estruturas biológicas, como gordura, sangue e outros fluidos corporais) e biomagnificado (bioacumulação progressiva).

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados parciais obtidos nesta pesquisa, uma gestão sustentável que integre as diretrizes da PNRS deve ser voltada para uma rota tecnológica que favoreça a reciclagem em vez de tecnologias que degradam os materiais em relação a sua natureza atual. Toda e qualquer tecnologia de queima de RSUs, exemplo de Estocolmo, deve ser evitada, uma vez que esta rota é concorrente com o reaproveitamento e a reciclagem e ameaça os princípios adotados nas diretrizes da PNRS e nas deliberações da IV CNMA. Os exemplos de Itaúna e Londrina, onde foi implantada a coleta seletiva solidária, abre oportunidades para a integração dos catadores no gerenciamento de resíduos, com resultados positivos em termos econômicos, sociais e ambientais.

Portanto, um modelo sustentável de rotas tecnológicas não deve ser baseado unicamente na proporção de resíduos que deixaram de ser depositados em aterros sanitários, mas aquele que retome características locais e traga o máximo de benefícios sociais, ambientais e econômicos. A combinação e a adaptação dos sistemas de gerenciamento adotados em Itaúna, Londrina, São Francisco e Renânia-Palatinado oferecem uma linha para a efetivação do conceito de lixo zero no Brasil mais coerente com os princípios da PNRS.

Para fundamentar essa conclusão, retomamos o quadro comparativo e as análises dos casos à luz do indicador ZWI apresentado anteriormente. Este indicador tem a vantagem de favorecer o equilíbrio do metabolismo ambiental ao privilegiar a reposição das diversas matérias-primas separadamente, introduzindo, dessa maneira, uma dimensão qualitativa no indicador quantitativo. Sem isso, tomado de forma bruta, como abstração numérica, bastaria que o lixo não fosse aterrado para se falar em lixo zero. O ZWI cria diferenciações qualitativas antes de se chegar ao mesmo “zero”, assegurando que materiais orgânicos sejam recuperados como matéria orgânica, vidro como vidro, plástico como plástico, assim por diante. Apesar de o resultado final ser um simples número, a forma de cálculo faz toda a diferença e orienta o projeto dos sistemas de gestão e tecnologias que o operacionalizam.

Evidentemente, por estar focado no desvio dos materiais do aterro, a simples taxa de desvio do aterramento não reflete os desafios e as tendências atuais de prevenção e reutilização, os próximos passos na hierarquia de tratamento de RSUs. O ZWI se apresenta como um índice orientador melhor que a taxa de não aterramento, por pontuar negativamente sistemas de gestão de resíduos incompatíveis ou concorrentes com a prevenção e a recuperação. Constitui-se, dessa maneira, uma interessante ferramenta de orientação estratégica para a definição de rotas tecnológicas sustentáveis no médio e longo prazo que sejam compatíveis e alinhadas com a hierarquia de tratamentos prevista na PNRS e os outros princípios sociais, ambientais e econômicos.

Concluindo, para além da evidenciada vantagem ambiental da reciclagem, a PNRS ainda reconhece o RSU como bem econômico gerador de trabalho e renda e estabelece a priorização da inclusão de cooperativas e outras formas de associações de catadores de materiais recicláveis nos SIGRSUs. Essa importante premissa deve ser respeitada, e uma rota baseada na incineração compromete sensivelmente a sua observação. Atualmente, observa-se um movimento, por parte das prefeituras brasileiras, no sentido de contratar cooperativas de catadores de materiais recicláveis para a operação de coleta seletiva municipal impulsionado por: *i*) exemplos positivos e inspiradores das experiências já existentes; *ii*) incentivos presentes na PNRS para a implementação de parcerias das prefeituras com organizações de catadores; e *iii*) pressões políticas e sociais exercidas pelos próprios catadores, seus movimentos e apoiadores, a fim de angariar essa conquista. Os catadores já assumiram o programa de coleta seletiva oficial em cinquenta municípios no Brasil (Leite, 2014). Essa tecnologia social, a coleta seletiva solidária, tem uma potente capacidade de incluir socioeconomicamente e de gerar trabalho e renda. Ademais, se bem desenvolvida nacionalmente, com os recursos e o tempo necessários para sua consolidação, ainda pode vir a ser a base principal de um robusto e inovador modelo brasileiro de SIGRSU, em conjunto com outras tecnologias sustentáveis, como a compostagem e a biodigestão anaeróbica.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, C. *et al.* **On the road to Zero Waste**: successes and lessons from around the world. Berkeley: Gaia, June 2012.
- ANTUNES LIMA, F. P. *et al.* **Prestação de serviços de coleta seletiva por empreendimentos de catadores**: instrumentos metodológicos para contratação. Belo Horizonte: Insea, 2013.
- BESEN, G.; JACOBI, P. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.
- CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Review 2013**. São Paulo: Cempre, 2013.
- CRIVELLARI, H. M. T.; DIAS, S. M.; PENA, A. de S. Informação e trabalho: uma leitura sobre os catadores de material reciclável a partir das bases públicas de dados. *In*: KEMP, V. H.; CRIVELLARI, H. M. T. (Org.). **Catadores na cena urbana**: construção de políticas socioambientais. Belo Horizonte: Autêntica Editora, jan. 2008. p. 299-324.

FUNDACIÓN AVINA. **Contratação pública municipal de uma cooperativa de catadores**: o caso da Cooper Região – Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis da Região Metropolitana de Londrina-PR. Salvador: Inspirar Ideias, 2012. 72 p. (Série Cata Ação, v. 1). Disponível em: <<http://tinyurl.com/contratacaopublicamunicipal>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

GRS/UFPE – GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Recife: Fade/UFPE, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas populacionais para os municípios brasileiros em 01.07.2013**. Brasília: IBGE, 7 out. 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2013/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 9 jun. 2014.

IEE – INTELLIGENT ENERGY EUROPE. **Renewable energy policy review** – Sweden. Bruxelas: IEE, 2012.

ITAÚNA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Itaúna**. Itaúna: Prefeitura Municipal, 2014.

LEITE, O. F. P. Catadores assumem coleta de lixo reciclável em 50 cidades do país. **Folha de S.Paulo**, 23 jun. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/06/1474724-catadores-assumem-coleta-de-lixo-reciclavel-em-50-cidades-do-pais.shtml>>. Acesso em: 7 jul. 2014.

LIMA, R. M. S. R. **Implantação de um programa de coleta seletiva porta a porta com inclusão de catadores**: estudo de caso em Londrina-PR. 2006. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

MINAS GERAIS. **Estudo econômico-financeiro para destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. Belo Horizonte: Bain&Company, mar. 2012.

NEGRÃO, M.; ALMEIDA, A. **Incineração de resíduos**: contexto e riscos associados. Paris: Fundação France Libertés, 15 jul. 2010. Disponível em: <<http://www.incineradornao.net/2010/07/incineracao-de-residuos-contexto-e-riscos-associados/>>. Acesso em: 18 jul. 2014.

RHEINLAND PFALZ. **Balanço 2012**. Mainz: Ministério da Ciência, Proteção Climática, Energia e Planejamento, 2012a.

_____. **Relatório anual e metas para os distritos da RenâniaPalatinado**. Mainz: Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung, 2012b.

RUTKOWSKI, J. E.; LIMA, F. P. A.; OLIVEIRA, F. G. Aprimoramento da gestão de resíduos sólidos urbanos por meio do incentivo à reciclagem: uma metodologia para cidades mais sustentáveis. *In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA AMÉRICA LATINA*, 3., 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Gral, 2013.

STOCKHOLM. **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos 2013-2016**. 2013. Disponível em: <<http://www.stockholm.se/avfallsplan>>. Acesso em: 27 jun. 2014.

UN HABITAT – UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. **Solid waste management in the world's city**. Washington: UN Habitat, 2010.

VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**. New York: Fu Foundation School of Engineering; Applied Science Columbia University, May 2002.

VIA PÚBLICA. **Estudo de alternativas de tratamento de resíduos sólidos urbanos**: incinerador mass burn e biodigestor anaeróbio. São Paulo, dez. 2012.

ZAMAN, A.; LEHMANN, S. Urban growth and waste management optimization towards “zero waste city”. **City, Culture and Society**, v. 2, n. 4, p. 177-187, 2011.

_____. The zero waste index: a performance measurement tool for waste management systems in a “zero waste city”. **Journal of Cleaner Production**, v. 50, n. 1, p. 123-132, 2013.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 ago. 2010.

ESTOCOLMO STAD. **Resíduos sólidos urbanos**: balanço 2012. Estocolmo: Stockholm Stad, 2012.

LIMA, J. *et al.* Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região Sul do Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 33-42, 2013.