

Eficiência energética dos resíduos sólidos por meio da coleta seletiva e processos de recuperação

Giovane Lopes Ferri¹, Gisele de Lorena Diniz Chaves^{2*}

¹Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES

²Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES

*Autor para correspondência, E-mail: gisele.chaves@ufes.br

Resumo: A população brasileira, bem como suas cidades, cresce de forma desestruturada, o que impacta no aumento da produção, no estímulo do consumo e na conseqüente geração de Resíduos Sólidos (RS), contrariando a ideologia dos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar). A partir de uma ordem de prioridade, busca-se reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada. Desta forma a Análise do Ciclo de Vida de um produto, processo ou atividade permite avaliar o impacto ambiental de bens e serviços. Assim, este artigo busca relacionar a utilização de funções logísticas com o atendimento às exigências legais para gestão dos resíduos sólidos, com vistas a evidenciar a eficiência energética alcançada na otimização dos transportes destes resíduos. A logística, por meio da racionalização de suas instalações e transporte pode minimizar o impacto na rede reversa para aproveitamento de resíduos e disposição adequada dos rejeitos.

Palavras chave: Eficiência energética, reaproveitamento energético, Política Nacional de Resíduos Sólidos.

1. Introdução

O crescimento das cidades brasileiras de forma não planejada e da economia do país impactaram diretamente no aumento da geração de resíduos (Chaves *et al.*, 2014). Esta premissa desafia a ideologia dos “3R's”, vinculado à redução, reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos - RS, nesta ordem de prioridade. O primeiro “R”, redução, requer uma mudança cultural no atual padrão de consumo. O segundo “R”, reutilização, é definido a partir de uma nova utilização de um resíduo sem que este sofra alguma alteração em suas propriedades químicas ou físicas, tal como a fabricação de vassouras de embalagens PET. Por fim, o terceiro “R”, a reciclagem, pode ser considerada como a reinserção do resíduo como uma matéria-prima para a produção de novos produtos (Nogueira Junior, 2006; Oliveira, 2002; Cândido, 2008).

Em contrapartida, a infraestrutura dos serviços urbanos nos municípios brasileiros, tais como o sistema de gestão dos resíduos sólidos urbanos - RSU necessários para o gerenciamento adequado destes, não acompanhou o aumento da geração dos resíduos. A geração dos RSU no Brasil aumentou 4,1% entre 2012 e 2013, um índice mais elevado que o crescimento populacional de 3,7% neste período. Aproximadamente 10% dos resíduos não foram coletados em 2013, o que corresponde a 6,9 milhões de toneladas. Apesar da elevada taxa de coleta para um país em desenvolvimento (90,4%), a destinação do RSU coletado ainda é precária: 58,3% do RSU coletado em 2013 teve uma destinação final inapropriada, tendo sido enviado para vazadouros a céu aberto (também conhecidos como lixões) e os aterros controlados, que carecem das infraestruturas necessárias para a proteção ao meio ambiente e à população (Ferri *et al.*, 2015b; Abrelpe, 2014).

Para orientar a implantação do manejo adequado dos RS e normatizar padrões e responsabilidades desde a criação e exploração de matérias-primas ao descarte e disposição dos RS, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei Nº 12.305 (Brasil, 2010a) foi promulgada em 2010. Este é o objeto legal para normalizar a prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, tendo como principais objetivos acabar com os lixões (cujo prazo já se extinguiu) e implantar a coleta seletiva, a logística reversa e a compostagem dos resíduos orgânicos. Estes objetivos configuram-se como desafios para o poder público e para o setor privado no País e, em especial, para os municípios, titulares dos serviços de limpeza pública, tendo em vista sua realidade.

A PNRS ainda define diretrizes básicas quanto a sustentabilidade econômica e ambiental para o sistema de gestão de RS. Este diploma expõe uma ordem de prioridade, sendo mais importante em seqüência: redução de resíduos, reutilização de resíduos, reciclagem de resíduos, tratamento de resíduos e

disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Machado, 2012). A partir desta ordem de prioridade, faz-se necessário alcançar diversos pontos mínimos, das quais destacam-se a redução, reutilização, e reciclagem com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada. Esta redução além de promover um melhor aproveitamento dos RSU, ainda propicia um aumento na vida útil dos meios de destinação ambientalmente corretos como, por exemplo, os aterros sanitários (Brasil, 2010a).

A afirmativa acima pode ser comprovada a partir da análise dos ciclos de vida dos diferentes materiais passíveis de serem reciclados, que inclui, além do processo de reciclagem, a coleta e o transporte destes materiais, bem como do aterro sanitário. A Análise do Ciclo de Vida de um produto, processo ou atividade é uma ponderação sistemática que quantifica os fluxos de energia e de materiais no ciclo de vida do produto, sendo que essa análise é utilizada para avaliar o impacto ambiental de bens e serviços (Ribeiro *et al.* 2003).

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo relacionar a utilização de funções logísticas com o atendimento às exigências legais para gestão dos resíduos sólidos, as quais buscam maximizar a utilização de materiais recicláveis na produção de novos produtos diminuindo assim a extração de novas matérias-primas. Esta relação é evidenciada pela eficiência energética alcançada na otimização dos transportes destes resíduos, tanto em termos de diminuição de seus custos de transporte quanto na diminuição das emissões de gases de efeito estufa relacionados ao transporte. Portanto, neste caso, a eficiência energética é considerada em termos econômicos e ambientais.

Para atender este objetivo, na seção 2, o presente artigo apresenta o marco regulatório para a gestão dos resíduos sólidos, na seção 3, discute-se a coleta seletiva e a destinação dos resíduos sólidos, e, na seção 4, é realizada uma breve descrição acerca da análise de ciclo de vida. Na seção 5, é apresentado um estudo de caso relacionando a utilização de funções logísticas com o atendimento às exigências legais para gestão dos resíduos sólidos pelo incremento da coleta seletiva. Por fim, na seção 6 serão colocadas as considerações finais.

2. Marco regulatório para a gestão dos resíduos sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010) normaliza a prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Esta norma é baseada em diversos princípios, tais como: a prevenção; a precaução; o respeito às diversidades locais e regionais; o direito da sociedade à informação e ao controle social; a razoabilidade e a proporcionalidade. Além destes, aborda princípios voltados a gestão dos resíduos, como por exemplo: o poluidor-pagador; o protetor-recebedor; a visão sistêmica, considerando a sinergia entre aspectos ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; o desenvolvimento sustentável (Brasil, 2010a; Machado, 2012).

O referido diploma ainda baseia-se em pilares voltados para a ecoeficiência, envolvendo controle de oferta de preços competitivos, de bens e serviços qualificados que promovam a qualidade de vida, a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais. A cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade, além da definição de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos são abordados para definir a participação e a responsabilidade de cada agente. Esta lei leva em consideração a inserção e o reconhecimento do RS reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda (Brasil, 2010b). Nesta norma legal, define-se resíduo sólido como bem ou objeto descartado em estado sólido ou semissólido, além de gases contidos em recipientes e líquidos cujas características tornem inviável a disposição destes na rede pública de esgotos. O RS que não apresenta possibilidade de tratamento, recuperação ou reciclagem é considerado rejeito, sendo necessário que sua disposição ocorra de forma ambientalmente adequada (Brasil, 2010a).

Em uma visão geral, a PNRS visa a gestão integrada de resíduos sólidos, além de estimular a rotulagem ambiental e o consumo sustentável (Brasil, 2010b). De Brito (2004) esquematiza, na configuração de uma pirâmide hierárquica de níveis de possibilidades de recuperação dos bens, os objetivos previamente descritos, como mostrado na Fig. 1.

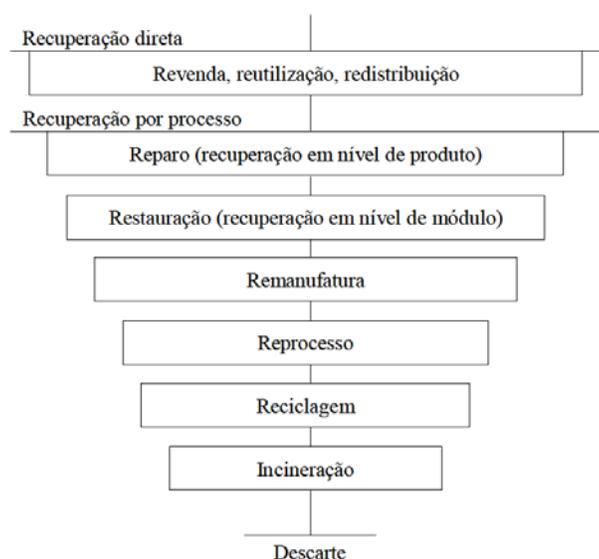


Figura 1: Pirâmide Invertida de Recuperação (De Brito, 2004, p. 63).

Uma hierarquia entre os diferentes tipos de recuperação é estabelecida, sendo a incineração preterida a reciclagem, ao reparo e a reutilização, sendo que a não geração e a redução entrariam como soluções acima da pirâmide, diminuindo o volume de materiais suscetíveis a recuperação. Como no Brasil, existe uma abundância de fontes energéticas renováveis, tais como, hídrica, solar e eólica, além de considerar a pirâmide invertida de recuperação, proposta por De Brito (2004), a incineração ou pirólise pode ser considerada como opção preterida em relação às demais. Ainda comparando as opções de recuperação propostas na pirâmide invertida, Fig. 1, faz-se necessário obter um melhor aproveitamento dos materiais passíveis de serem reciclados. Desta forma, deve-se priorizar a recuperação de valor a um nível mais elevado, ou a substituição de materiais não recicláveis para recicláveis em embalagens, por exemplo.

A destinação final ambientalmente correta é considerada como descarte do resíduo, que não pode passar pelas etapas anteriores considerando este como rejeito. A PNRS proíbe a destinação final de RS em quaisquer corpos hídricos, *in natura* a céu aberto, ou a queima a céu aberto ou em instalações não licenciadas para essa finalidade (Brasil, 2010a). A disposição final segura não deve, de forma alguma, danificar o meio ambiente, nem atingir, de maneira direta ou indireta, a sociedade, sendo que, a falta de controle dos resíduos durante a sua disposição final pode trazer sérios impactos ambientais. Desta forma, faz-se necessária a utilização de aterros sanitários, os quais deverão ser projetados e viabilizados por meio da coleta seletiva, a qual potencializa a utilização de materiais recicláveis, de forma a reduzir a quantidade de materiais destinados a estes locais, o que prolonga sua vida útil.

A lei prioriza o acesso aos recursos da União aos municípios que implantarem a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda (Brasil, 2010a). A PNRS prevê que o poder público pode estabelecer medidas indutoras e linhas de financiamento para fomentar iniciativas voltadas para a prevenção e redução da geração de RS, desenvolvimento de produtos com menores impactos à saúde, desenvolvimento de projetos de gestão dos resíduos sólidos de caráter intermunicipal, estruturação de sistemas de coleta seletiva e de logística reversa (Brasil, 2010b). As medidas indutoras cabíveis para fomentar as iniciativas descritas acima podem ser por meio de incentivos fiscais, financeiros e creditícios, cessão de terrenos públicos, subvenções econômicas, pagamento por serviços ambientais, apoio à elaboração de projetos e transferência de toda destinação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis (Brasil, 2010a).

O programa de coleta seletiva funciona mediante a segregação prévia dos resíduos sólidos, conforme sua composição, sendo que a implantação do sistema de coleta seletiva é instrumento essencial para se atingir a meta de disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010b). Desta forma, um programa de coleta seletiva de resíduos torna-se parte essencial do Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Município, articulando-se, de maneira integrada, com as demais técnicas a serem adotadas para o tratamento e destinação de resíduos. É importante salientar que, independente do método eleito para tratamento dos resíduos: compostagem, incineração, reciclagem, qualquer método de

recuperação energética ou uma combinação destes, sempre haverá uma parcela maior ou menor de rejeitos, que devem ser destinados adequadamente em um aterro sanitário.

3. Coleta seletiva e a destinação dos resíduos sólidos

Atendendo a diversos requisitos de proteção ambiental, tais como: coleta e tratamento do chorume, cobertura periódica do rejeito com terra ou material inerte, impermeabilização, coleta e queima dos gases, o aterro sanitário é o empreendimento que consegue fazer com que os resíduos sejam dispostos de uma forma correta. A implantação de novos aterros demanda investimentos de altos valores por parte do poder público em seus diversos níveis e esferas, além de esforço para desapropriação de áreas para estes empreendimentos. Por esses motivos, é relevante à otimização da vida útil dos aterros sanitários por meio da reutilização e reciclagem de materiais. Outro benefício da reciclagem é a geração de emprego, melhor distribuição de renda e promoção do desenvolvimento socioeconômico. Tais benfeitorias justificam o investimento em sistemas de coleta seletiva de resíduos, realizados por grupos de catadores organizados independentes (Galbiati, 2004).

A separação dos materiais recicláveis e matéria orgânica não contaminada na fonte, bem como a adesão a programas de coleta seletiva podem diminuir custos com remoção de resíduos (Galbiati, 2004). No entanto, usualmente, a separação domiciliar de resíduos sólidos é descontínua pela carência de um programa de coleta seletiva ininterrupto, o que pode resultar em uma percepção de que tal técnica não tenha utilidade prática para a construção da cidadania. Para o funcionamento efetivo do programa de coleta seletiva é indispensável o envolvimento e comprometimento da população, o que requer um programa de comunicação e educação ambiental e um sistema de coleta de resíduos bem estruturado e contínuo (Gonçalves, 2003). Somente a ação conjunta dos órgãos de pesquisa, de organizações populares e do governo, pode originar soluções que proporcionem a implantação da coleta seletiva em todos os municípios, atendendo às suas características específicas.

A efetiva implantação de um sistema de coleta seletiva é diretamente proporcional ao aproveitamento de materiais recicláveis, o que reduz a parcela de resíduos recicláveis tratados como rejeitos e destinados aos aterros sanitários, ocasionando um aumento da vida útil destes, além de contribuir de maneira significativa no que diz respeito a eficiência energética de todo o sistema, como por exemplo, reduzindo a quantidade de combustível utilizada para o transporte destes rejeitos (Ferri *et al.*, 2015a).

Portanto, a coleta seletiva baseia-se em três pilares, sendo planejada com base no fluxo reverso do produto. Inicialmente define-se a destinação adequada para cada material, seguida da estrutura logística adotada para a coleta e, por fim, faz-se necessário a elaboração de um programa de educação ambiental constante. A legislação vigente prevê a implantação progressiva da coleta seletiva pelos bairros dos municípios brasileiros (Brasil, 2010b). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos ainda dispõe de metas de redução dos resíduos recicláveis dispostos em aterros sanitários (Brasil, 2012) e a coleta seletiva é essencial para o alcance desta meta.

A matéria orgânica é responsável por produzir chorume e gases causadores do efeito estufa nos aterros. A compostagem residencial da referida matéria pode reduzir em cerca de 50% a quantidade de resíduos destinados a aterros, além de gerar composto orgânico, que é utilizado como condicionador e fonte de nutrientes para solos e plantas (Fehr, 2007). Vale ressaltar que o resíduo oriundo da poda das árvores pode ser compostado, desde que previamente triturado. Todavia, se a compostagem for feita, sem segregação na fonte, e, apenas separando o resíduo em esteiras, há possibilidades de apresentar índices intoleráveis de contaminação por metais pesados, elementos tóxicos e microrganismos patogênicos, reduzindo a aceitação do produto para utilização na agricultura (Galbiati, 2004).

Outra solução, utilizada como destinação final de resíduos sólidos é a pirólise ou incineração com recuperação de energia, pois além de diminuir o volume encaminhado aos aterros gera energia. Porém, tal recurso não atende ao aspecto social da reciclagem, pois, a manutenção de uma usina desta natureza requer fornecimento ininterrupto com materiais de alto potencial calorífico, que são, com poucas ressalvas, os mais propícios para a reciclagem como os plásticos, papeis e papelão, ocasionando um conflito de interesses entre a produção de energia na usina e a valorização laboral dos catadores (Galbiati, 2004), além das questões ambientais.

Referente à recuperação energética dos resíduos, deve-se comparar a quantidade de energia recuperada com a quantidade de energia que seria economizada no ciclo de vida dos materiais, no caso de serem reciclados. Em sua maioria, o processo industrial de reciclagem consome expressivamente menos energia que a produção a partir de material virgem. Os atores presentes na análise de ciclo de vida da reciclagem, tais como, o gerador de resíduo sólido, o coletor, o responsável pela triagem do resíduo, o intermediário e

a indústria. Além destes atores, o Estado deve ser um participante ativo em todo o processo de reciclagem. Nas esferas federal, estadual ou municipal, a gestão pública deve determinar a função de cada ator na cadeia produtiva da reciclagem, sob o enfoque ambiental, social e econômico. Cabe ainda à União legislar sobre políticas públicas de apoio à reciclagem, atrair empresas que possam fomentar a cadeia produtiva da reciclagem; instituir parcerias com os cidadãos e iniciativa privada. Enquanto à sociedade, compete a função de discutir, propor demandas ao poder público e assumir o controle social.

Portanto, devem ser estabelecidas parcerias entre governo e trabalhadores, com objetivos comuns, tais como a diminuição dos custos com a coleta regular dos resíduos sólidos e operação de aterros sanitários, a preservação dos recursos naturais, o desenvolvimento local e sustentável e a educação ambiental. Caso tal parceria não se concretize, o sistema será falho, com baixos índices de reciclagem, exclusão social e prejuízos ao meio ambiente. Contudo, fatores econômicos, tais como, a utilização de matérias-primas provenientes de reciclagem e a recuperação dos materiais recicláveis promovem o funcionamento do sistema de logística reversa (Leite, 2003). Assim, a análise do ciclo de vida entra como uma ferramenta que possibilita uma avaliação desde a obtenção das matérias-primas utilizadas ao descarte ou recuperação do produto.

4. Análise do ciclo de vida - ACV

Antes de analisar o conceito de logística reversa, deve ser analisado um conceito mais vasto que é o do ciclo de vida. A vida de um produto, à luz da logística, não cessa com sua entrega ao cliente. Aqueles que se tornam obsoletos, forem danificados, ou não funcionam da forma prevista devem retornar ao seu ponto de origem para o adequado descarte, reparação ou reaproveitamento (Lacerda, 2003). A avaliação ou análise do Ciclo de Vida pode ser definida como uma ferramenta para aferir, de maneira holística, uma atividade ou um produto durante toda sua vida. O ciclo é a história do produto, desde a fase de extração das matérias-primas, passando pela fase de produção, distribuição, consumo, uso e até sua transformação em resíduo e seu descarte, considerando os fluxos de retorno referentes (Vigon *et al.* 1993).

O objetivo geral desta análise consiste em avaliar e compreender a magnitude e importância dos impactos ambientais baseados na análise do inventário. O principal resultado da aplicação da Análise do Ciclo de Vida – ACV é a minimização da intensidade da poluição causada por um determinado processo. A conservação de matérias-primas não renováveis, como algumas fontes de energia, pode ser também o objetivo de uma avaliação, assim como a conservação de sistemas ecológicos em áreas sujeitas a um balanço de suprimentos preciso, como regiões onde a água é escassa. Assim, a produção de resíduos representa perda de reservas e resulta em degradação do meio ambiente (Ryding, 1994).

Do ponto de vista financeiro, fica evidente que, além dos custos de compra de matéria-prima, de produção, de armazenagem e estocagem, o ciclo de vida de um produto inclui também outros custos que estão relacionados a todo o gerenciamento do seu fluxo reverso. Do ponto de vista ambiental, esta é uma forma de avaliar o impacto que um produto gera sobre o meio ambiente durante toda a sua vida. Esta abordagem sistêmica é fundamental para planejar a utilização dos recursos logísticos de forma a contemplar todas as etapas do ciclo de vida dos produtos. (Lacerda, 2003)

O impacto é avaliado por meio da utilização de fatores de impacto e fatores de peso, mas esta aproximação gera controvérsias por não considerar as condições locais onde ocorre a emissão. Estas condições não podem ser incorporadas ao resultado da avaliação do impacto, que apesar da análise extremamente detalhada, deve ser, então, tomada somente em termos genéricos. Por este motivo, muitos estudos de ACV limitam-se a avaliações qualitativas que estabelecem escalas de dano para as substâncias (Ribeiro, Giannetti e Almeida, 2003).

Neste tipo de abordagem, estabelece-se o risco relativo com base na classificação dos impactos ambientais estabelecido, por exemplo, pela *Science Advisory Committee* da EPA em 1990. Este tipo de abordagem é de mais simples aplicação e útil quando se compara produtos ou processos. O primeiro estágio em qualquer processo é o da extração de recursos naturais. As atividades de extração são utilizadas para produzir os recursos consumidos durante o ciclo de vida o produto (Ribeiro, Giannetti e Almeida, 2003). A reciclagem produz menos resíduos sólidos, líquidos e gasosos do que a extração de material virgem. O estágio de implementação é um item que trata do impacto ambiental que resulta da atividade necessária para implantar o processo. Inclui, principalmente, a manufatura e a instalação dos equipamentos e outros recursos necessários (Ribeiro, Giannetti e Almeida, 2003).

Um processo tem que ser pensado para ser ambientalmente responsável quando em operação. Devem-se levar em consideração as etapas anteriores e posteriores a um determinado processo (processos complementares). Por exemplo, a escolha de um determinado processo determina as etapas complementares

(limpeza, lavagens) e os impactos ambientais causados por estas atividades devem, também, ser considerados. A obsolescência do equipamento deverá ser considerada e, portanto, deve-se prever a reutilização de módulos (opção preferível) ou materiais. O equipamento está sujeito às mesmas regras aplicadas a qualquer produto (Ribeiro, Giannetti e Almeida, 2003).

A eficiência energética da reciclagem de resíduos pode ser exemplificada com o alumínio, tendo em vista que, para cada quilo de alumínio reciclado, cinco quilos de bauxita deixam de ser usados, e ainda, para se reciclar o alumínio, gastam-se somente 5% da energia que seria utilizada na produção do alumínio primário. A reciclagem do alumínio traz benefícios ao meio ambiente e ao país, economizando matéria-prima e energia elétrica. Além disso, a reciclagem reduz o volume de lixo enviado aos aterros sanitários e ajuda a manter a cidade limpa (Ribeiro, Giannetti e Almeida, 2003).

Quando o aço é produzido inteiramente a partir da sucata, a economia de energia chega a 70% do que se gasta com a produção a base do minério de origem. Além disso, há uma redução da poluição do ar (menos 85%) e do consumo de água (menos 76%), eliminando-se, ainda, todos os impactos decorrentes da atividade de mineração. O papel jornal produzido a partir das aparas requer 25% a 60% menos energia elétrica que a necessária para obter papel da polpa da madeira. O papel feito com material reciclado reduz em 74% os poluentes liberados no ar e em 35% os despejados na água, além de reduzir a necessidade de derrubar árvores. Na reciclagem do vidro é possível economizar, aproximadamente, 70% de energia incorporada ao produto original e 50% menos de água (Ambiente Brasil, 2014).

Com a reciclagem de plásticos economiza-se até 88% de energia em comparação com a produção a partir do petróleo e preserva-se esta fonte esgotável de matéria-prima. Em resumo, a ACV pode ser utilizada para obter-se um melhor entendimento de todo o sistema utilizado para se produzir um produto, e consequentemente aprimorá-lo (Ambiente Brasil, 2014).

Considerando que, a ACV engloba as etapas de coleta, transporte e o processo de reciclagem, além de considerar os insumos e materiais consumidos para o efetivo o retorno do material, a seção subsequente expõe um estudo de caso de uma rede de logística reversa com a implantação gradativa da coleta seletiva. Além da utilização de dois caminhos distintos dentro do ciclo de vida dos resíduos orgânicos, o primeiro com a recuperação, ou compostagem, realizada em larga escala após a etapa de coleta, e o segundo com este procedimento sendo realizado em domicílio, funcionando como pequenos pontos de compostagem.

5. Rede de logística reversa: um estudo de caso sobre eficiência energética pela ACV

O estudo de caso foi realizado no município de São Mateus, localizado no estado do Espírito Santo. Antes da implantação em nível local da PNRS, os RSU coletados neste município eram enviados para um vazadouro a céu aberto (lixão). Algumas associações (formais ou não) atuavam com a coleta de resíduos passíveis de reciclagem. No entanto, a prefeitura assinou um Termo de Ajuste de Conduta com o Ministério Público do Espírito Santo para implantar as exigências da PNRS (AMUNES, 2014). A rede de logística reversa proposta para o gerenciamento dos RSU neste município, baseada nos estudos de Ferri *et al.* (2015ab) envolve a inserção de Centros de Triagem e Armazenagem (CTA) em locais estratégicos. Estes CTA são responsáveis por triar os materiais passíveis de serem reciclados potencializando um lucro máximo envolvendo um balanceamento entre o potencial de receita gerada a partir da venda de materiais recicláveis para indústrias de reciclagem e atravessadores de materiais recicláveis, e o custo envolvendo a instalação e funcionamento de todo o fluxo reverso de RS, inclusive os custos logísticos.

Anteriormente, este RS era coletado e enviado diretamente ao vazadouro a céu aberto (lixão) localizado na periferia da cidade. Levando em consideração que os custos logísticos influenciam diretamente no gerenciamento dos RS, os CTA se justificam pela diminuição do volume de resíduos destinados ao aterro, reduzindo os custos de transporte e aumentando a vida útil do aterro sanitário, além de permitir a comercialização de materiais passíveis de serem reciclados (Carvalho e Xavier, 2014). Segundo D'Almeida e Vilhena (2000), para longas distâncias é recomendado o uso de estações de transferência que limitem o percurso de veículos coletores. Desta forma, os RS são transferidos para veículos maiores que fazem o transporte até o local de disposição final.

O estudo e o correto emprego de uma rede de logística reversa para os RS, baseado na utilização de centros de triagem e armazenagem, com a implantação da coleta seletiva, podem ser economicamente viáveis quando analisado um comparativo entre os custos da solução mínima para atender aos requisitos da legislação e os custos da coleta seletiva em termos financeiros absolutos e imediatos, sendo que, em alguns casos, a viabilidade econômica pode ser entendida como a independência de recursos externos do projeto, ou seja, se o projeto é autossustentável. O principal fator para ponderar a viabilidade econômica de um

programa de coleta seletiva e reciclagem é o comparativo entre os custos deste programa por tonelada de resíduo coletada com o custo da coleta regular (Aguiar e Philippi Jr., 2000).

Desta maneira, este estudo de caso baseia-se em uma modelagem matemática inteira mista (Ferri *et al.*, 2015a), a qual objetiva maximizar o lucro total de toda a rede de logística reversa, levando em consideração uma implantação gradativa da coleta seletiva, além de comparar, numericamente com um cenário baseado apenas em uma coleta regular de resíduos sólidos, sem coleta seletiva implementada, conforme Tabela 1. O lucro total refere-se a diferença entre a receita total e o custo total, sendo que, a receita pode ser obtida a partir da comercialização de materiais recicláveis e de composto orgânico, já o custo total engloba os custos de transporte, coleta, instalação e operação dos CTA. Os parâmetros deste modelo podem ser obtidos em Ferri *et al.* (2015ab).

Tabela 1: Resultados da implementação gradativa da coleta seletiva. *Todos os valores são representados em (1.000 R\$/ano).

Percentual de implementação da coleta seletiva, %	Lucro total*	Custo total*	Receita total*
0	-144,44	361,64	217,21
20	1.560,13	625,17	2.185,30
40	3.385,28	768,13	4.153,42
60	5.223,03	898,52	6.121,54
80	7.070,842	1.018,81	8.089,66

De acordo com a Tabela 1, a implantação da coleta seletiva é economicamente viável e torna-se atrativa para os responsáveis pelo setor de materiais recicláveis tendo em vista o valor econômico agregado à comercialização destes materiais, além de considerar o atendimento as normas legais destinadas a regular estas atividades. Como por exemplo, a meta presente no Plano Nacional de Resíduos Sólidos que refere-se à redução em percentual dos resíduos recicláveis dispostos em aterros, para a região Sudeste, é de 30% para 2015 e 42% para 2023 (Brasil, 2012, p. 80), o que minimiza os impactos gerados tanto pelo transporte destes resíduos para este meio de destinação, além de todos os subprodutos gerados com a atividade realizada nos aterros sanitários, como por exemplo, o chorume.

Assim, a utilização de CTA, uma facilidade logística, potencializa a geração de receita, além de promover um melhor aproveitamento do RSU. Esta receita pode custear o Programa de Educação Ambiental requerido pela PNRS e exigido no TAC assinado pela prefeitura. A Fig. 2 ilustra a disposição geográfica dos CTA propostos para o município de São Mateus considerando a maximização do lucro total da rede de logística reversa, referente à implementação de 20% de coleta seletiva.

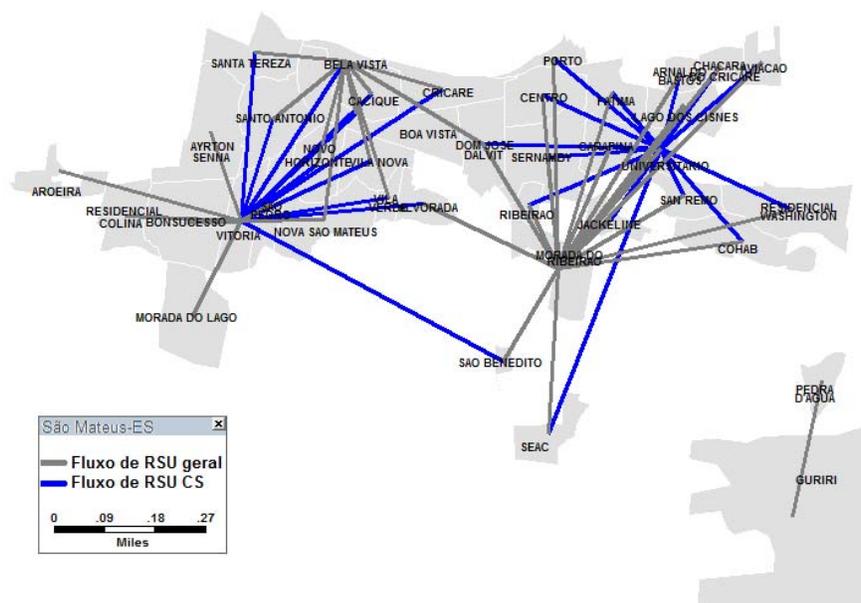


Figura 2: Proposta de Rede de Logística Reversa referente a implementação de 20% de Coleta Seletiva.

Além da viabilidade da implantação da coleta seletiva apresentada pela Tabela 1, este estudo de caso avaliou cenários envolvendo a aplicação de uma análise do ciclo de vida dos resíduos orgânicos, sendo que estes correspondem a cerca de 51% do total de RS gerado (Brasil, 2012, p. 7). Os resíduos orgânicos não são comercializáveis, sendo necessário realizar um processo, denominado compostagem, a fim de transformá-los em composto ou adubo orgânico, o qual possui um valor de mercado significativo, podendo ser utilizado como produto substituto do adubo químico (CEMPRE, 2014).

A fim de viabilizar a transformação do resíduo orgânico em adubo, foram considerados dois cenários diferentes, impactando de maneira direta no ciclo de vida deste produto. O primeiro cenário considera o processo de compostagem nos CTA, os quais recebem os resíduos coletados pela coleta convencional e realizam a separação dos resíduos orgânicos não contaminados. Vale ressaltar que neste cenário o potencial de compostagem é reduzido devido a mistura destes resíduos aos demais. Outro cenário considera a aplicação da compostagem domiciliar, ou seja, na fonte geradora, o que possibilita um maior aproveitamento do potencial dos resíduos passíveis de serem compostados. Assim, as Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos cenários descritos acima.

Tabela 2: Receitas geradas nos cenários. *Todos os valores estão representados por 1.000 R\$/ano.

Cenários*	Reciclagem	Interceptor	Total
Compostagem nos CTA	1.937,60	247,70	2.185,30
Compostagem domiciliar	1.937,60	204,28	2.141,88

Tabela 3: Custos gerados nos cenários. *Todos os valores estão representados por 1.000 R\$/ano. **O custo de coleta refere-se a soma dos custos da coleta seletiva e da coleta regular.

Cenários*	Reciclagem	Interceptor	Aterro sanitário	Coleta**	Total
Compostagem nos CTA	61,44	7,44	208,05	190,29	625,17
Compostagem domiciliar	61,44	7,44	185,91	175,32	588,06

Tabela 4: Resultados dos cenários. *Todos os valores estão representados por 1.000 R\$/ano.

Cenários*	Receita total	Custo total	Lucro total
Compostagem nos CTA	2.185,30	625,17	1.560,13
Compostagem domiciliar	2.141,88	588,06	1.553,82

Com a implantação da compostagem nos domicílios, a receita gerada com a venda do adubo orgânico gerado, representada na Tabela 2 como a receita proveniente dos interceptadores, é reduzida. Contudo, os custos, representados pela Tabela 3, referentes a coleta destes resíduos e ao transporte de todo o rejeito ao aterro sanitário também são reduzidos ao implementar a compostagem domiciliar. Vale ressaltar que, além da redução dos custos de transporte destes resíduos, os custos ambientais correspondentes a quantidade de resíduo orgânico não enviado para os aterros sanitários, além dos custos de operação destes não foram considerados no modelo. A redução desta quantidade enviada para este meio de destinação final aumenta a vida útil do empreendimento, além de reduzir, em termos de consumo energético (ou eficiência energética), o consumo de combustível necessário para transportar esta quantidade de resíduos, tanto por meio da coleta domiciliar, quanto por meio do transporte do rejeito para o aterro sanitário. De acordo com as composições gravimétricas fornecidas por Bassani (2011) e Brasil (2012) o percentual de RS passíveis de serem reciclados aumenta com a implementação da coleta seletiva o que reflete com um aumento na quantidade de RS passíveis de serem reciclados.

6. Considerações finais

Os diferentes tipos de recuperação de resíduos atuam de maneiras distintas possibilitando um aumento em potencial quanto a eficiência energética destes. A pirâmide invertida, proposta por De Brito (2004) evidencia estes tipos de recuperação, sendo que, a utilização complementar destas recuperações possibilita um melhor aproveitamento energético destes resíduos.

A eficiência energética entre a produção de matérias-primas recicladas é maior quando comparada às matérias-primas virgens, além da redução de impactos ambientais, tais como a poluição do ar, consumo de água, impactos referentes as atividades de extração (desmatamento, erosão, entre outras). No entanto, a

reciclagem requer uma rede logística reversa para tornar viável a coleta dos RSU. Com o aumento da coleta seletiva, maior é o potencial de recuperação de materiais para esta rota tecnológica. Centros de Triagem e Armazenagem em nível municipal podem maximizar a eficiência da rede de logística reversa, gerando economia ou receita que pode ser empregada em atividades de educação ambiental para garantir o suporte necessário à população e a sustentabilidade desta prática em longo prazo.

No que diz respeito a utilização da análise de ciclo de vida como ferramenta para aumentar a eficiência energética de uma rede de logística reversa de resíduos sólidos, o adiantamento do processo de compostagem de resíduos sólidos a um nível primário reduz o consumo energético de combustível utilizado para transporte, além de reduzir a energia gasta para produção e controle do aterro sanitário. Vale ressaltar que, o adiantamento da compostagem possibilita um aproveitamento energético mais rápido dos resíduos.

Portanto, este artigo contribui por evidenciar a eficiência energética dos resíduos sólidos considerando diferentes tipos de recuperação, desde que estruturados pela logística reversa. Como a coleta seletiva enfrenta muitas barreiras para implantação devido seus elevados custos iniciais, espera-se que este estudo possa motivar e orientar os envolvidos, principalmente a gestão pública municipal, que a implantação de CTA e da compostagem dos resíduos orgânicos podem viabilizar, por meio do retorno aos investimentos, os gastos com conscientização da população para a coleta seletiva e seus custos de iniciais. Apesar de o estudo ter sido realizado com dados do município de São Mateus, pode-se inferir que os benefícios da implantação do CTA e compostagem dos resíduos orgânicos são gerais a todos os municípios. A dimensão financeira deste benefício é que deve ser analisada para os casos específicos, pois vão envolver as distâncias a serem percorridas e custos de instalação que são característicos de cada local de implantação. Os custos ambientais correspondentes à quantidade de resíduo orgânico não enviado para os aterros sanitários, além dos custos de operação destes não foram considerados no modelo e seguem como sugestão de inclusão em estudos futuros de Análise do Ciclo de Vida.

Agradecimentos

A FAPES pelo apoio financeiro.

Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: 2011. 198 f. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em: 15 Setembro 2012.

Aguiar, A.; Philippi Jr, A. Custos de Coleta Seletiva: critérios de apuração e viabilidade dos programas. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXVII, 2000, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: AIDIS, 2000.

Ambiente Brasil. Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Reciclagem.2014. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/analise_do_ciclo_de_vida_%28acv%29_e_reciclagem.html?query=analise+do+ciclo+de+vida+reciclagem>. Acesso em: agosto de 2014.

AMUNES. Termo de Compromisso Ambiental. Sistema de Acompanhamento dos TCA. Associação dos Municípios do Estado do Espírito Santo. Vitória, ES, 2014.

Bassani, P. D. Caracterização de resíduos sólidos de coleta seletiva em condomínios residenciais: Estudo de caso em Vitória-ES. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

Brasil. Lei Nº 12.305, de 02 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 República Federativa do Brasil, Brasília, 2010a.

_____. Decreto Nº 7404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, 2010b.

_____. Decreto Nº 7405, de 23 de dezembro de 2010. Institui o Programa Pró-Catador e dá outras providências. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, 2010c.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. (Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais). Brasília, 2012.

Carvalho, T. C. M. de B; Xavier, L. H. Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. Fichas Técnicas. 2014. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em: 10 de Jan 2014.

Chaves, G. L. D; Santos Junior, J. L; Rocha, S. M. S. The challenges for solid waste management in accordance with Agenda 21: a Brazilian case review. *Waste Management & Research*, v. 32, p. 1-13, 2014.

De Brito, M. P. Managing reverse logistics or reversing logistics management?324 f. Tese (Doutorado) – Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, 2004.

D’Almeida, M. L. O.; Vilhena, A. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

Fehr, M. *Confirming decentralized composting as a definite option in urban waste management*. *International Journal of Environmental Technology and Management*, v. 7, n. 3, p. 274-285, 2007.

Ferri, G. L.; Chaves, G. L. D.; Ribeiro, G. M. Análise e localização de centros de armazenamento e triagem de resíduos sólidos urbanos para a rede de logística reversa: um estudo de caso no município de São Mateus, ES. *Prod.*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 27-42, Mar. 2015a.

Ferri, G. L., Chaves, G. D. L. D.; Ribeiro, G. M. *Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement*. *Waste Management*, vol. 40, Pages 173–191, June 2015b.

Galbiati, A. F. O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e a Reciclagem. 2004. Disponível em: <www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_15.pdf>.

Gonçalves, P. A reciclagem integradora dos aspectos ambientais sociais e econômicos. Rio de Janeiro: DP&A: FASE, 2003.

Lacerda, L. Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos e as práticas operacionais. In: Figueiredo, K F; Fleury, P F; Wanke, P. (orgs.) *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos*. COPPEAD, UFRJ. São Paulo: Atlas, 2003.

Leite, P. R. *Logística Reversa: meio ambiente e competitividade*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

Machado, P. A. L. Princípios da política nacional de resíduos sólidos. *Revista do Tribunal Regional Federal da 1ª Região*. v. 24, n. 7, p. 25–33, jul. 2012.

Ribeiro, C. M; Giannetti, B. F; Almeida, C. M. V. B. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma Ferramenta Importante da Ecologia Industrial. *Revista de Graduação da Engenharia Química*. ANO VI, No. 12 Jul-Dez.2003.

Ryding, S. *"International Experiences of Environmentally Sound Product Development Based on Life Cycle Assessment"*, Swedish Waste Research Council, AFR Report 36, Stockholm, 1994.

Vigon, B. W; Tolle, D. A; Cornary, B. W; Lathan, H. C; Harrison, C. L; Bouguski, T. L; Hunt, R. G; Sellers, J. D. *"Life Cycle Assessment: inventory guidelines and principles"*, EPA/600/R-92/245, Cincinnati, U.S. Environmental Protection Agency, Risky Reduction Engineering Laboratory, 1993.