

Avaliação do ciclo de vida do processo biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia

Life cycle assessment of the anaerobic digestion process of municipal solid waste for power generation

Luana de Assis Silva¹, Fábio Rubens Soares² e Emília Satoshi Miyamaru Seo³

¹ Engenheira Ambiental do Centro Universitário Senac/SP.

² Professor e pesquisador do Centro Universitário Senac.

³ Professora e pesquisadora do Centro Universitário Senac e do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP.

{Luana, Fábio, Emília} luana.assis.silva@hotmail.com, fabio.rsoares@sp.senac.br, emilia.smseo@sp.senac.br

Resumo. Este artigo tem por objetivo identificar os impactos ambientais do processo de destinação de RSU por meio da biodigestão anaeróbia visando a obtenção de energia elétrica, por meio do uso da ferramenta Avaliação do ciclo de Vida. A ACV foi realizada com uso do software SimaPro onde a análise de inventário foi obtida com o uso do banco de dados do Ecoinvent, foi aplicada a metodologia Norte Americana TRACI que avalia os impactos ambientais baseando-se nas seguintes categorias de impacto: aquecimento global, acidificação, saúde humana carcinogênicos, saúde humana não carcinogênicos, efeitos respiratórios, eutrofização, depleção do ozônio, ecotoxicidade e poluição. A aplicação da ACV permitiu verificar que entre as categorias de impacto a etapa que mais contribui é a disposição em aterro. Foi possível verificar um aumento considerável dos resultados de curto prazo para os de longo prazo nas categorias carcinogênicos, não carcinogênicos e ecotoxicidade devido as substâncias consideradas para essas categorias, que representam risco a saúde humana, a fauna e a flora.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Biodigestão Anaeróbia, Avaliação do Ciclo de Vida.

Abstract. This article aims to identify the environmental impacts of disposal of MSW by anaerobic digestion in order to obtain electricity through the use of Life Cycle Assessment tool. ACV was performed with use of the software SimaPro where the inventory analysis was obtained using the Ecoinvent database was applied to U.S. TRACI methodology that evaluates the environmental impact based on the following impact categories: global warming, acidification, carcinogenic human health, human health not carcinogenic, respiratory effects, eutrophication, ozone depletion, ecotoxicity and smog. The application of LCA has shown that between the impact categories the stage that contributes most is the disposal in landfills. We observed a considerable increase in short-term results for long-term in categories carcinogenic, not carcinogenic and ecotoxicity because the substances considered for these categories, which represent risk to human health, fauna and flora.

Key words: Municipal Solid Waste, Anaerobic Digestion, Life Cycle Assessment.

InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade
Vol. 10 no 1 – Junho de 2015, São Paulo: Centro Universitário Senac
ISSN 1980-0894

© 2015 todos os direitos reservados - reprodução total ou parcial permitida, desde que citada a fonte

Portal da revista InterfacEHS: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/>
E-mail: interfacehs@sp.senac.br

1. Introdução

O crescimento contínuo e acentuado da população mundial tem tornado o gerenciamento de resíduos um dos principais desafios atuais, tendo em vista a complexidade de encontrar uma solução para destinação/tratamento dos resíduos que são gerados em quantidade cada vez mais elevada (SANTOS, 2011).

Para este mesmo autor, a disposição final em aterros continua sendo a técnica mais praticada no gerenciamento de RSU. Por consistir na alternativa ainda mais barata de disposição de resíduos, é a técnica mais utilizada no Brasil, contudo em áreas menos desenvolvidas os locais de disposição dos resíduos são predominantemente lixões ou aterros controlados. No Brasil, a responsabilidade de gerenciamento dos RSU cabe aos municípios. Considerando que existe grande número de municípios de população pequena, e ainda que a viabilidade técnica e econômica para a operação de um aterro sanitário requer uma quantidade mínima de resíduos a ser tratado, é evidente que há um cenário de dificuldade no gerenciamento dos RSU nessas pequenas cidades.

Ainda segundo Santos (2011), o grande problema da disposição final de RSU em aterros sanitários é o passivo ambiental gerado durante as operações, que mesmo após o seu encerramento perdura por muitos anos, inviabilizando a utilização de grandes áreas por longos períodos. Além disso, mesmo com todos os critérios de engenharia e normas operacionais, um aterro sanitário possui grande potencial de causar impactos ambientais ao solo, à atmosfera e aos recursos hídricos locais.

A disposição de resíduos em lixões, aterros controlados ou até mesmo em aterros sanitários, resultam no processo de biodigestão da fração orgânica desses resíduos, gerando chorume e gases que devem ser coletados e tratados. O gás gerado neste processo é composto principalmente de carbono e metano, estima-se que de 5% a 20% das emissões antropogênicas de gás metano são provenientes da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos (AMARAL, 2004).

O aproveitamento energético do metano através da biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos se mostra uma alternativa importante ao passo que resolve o problema da disposição dos RSU e mitiga os impactos ambientais causados pelas emissões dos aterros, além de inserir na matriz energética uma fonte sustentável (AMARAL, 2004).

Visto que o crescimento nos investimentos em fontes alternativas de energias e a busca pela diversificação da matriz energética em todo país, resultam em uma tendência na produção e no crescimento do potencial na geração de biogás. Dessa forma, as usinas de biogás compõem uma alternativa possível às regiões que necessitam de tratamento de resíduos, através do uso de reatores anaeróbios que promovem o saneamento, previnem a poluição e a contaminação dos recursos hídricos e do solo (SOUZA et. al., 2012).

A energia gerada a partir do tratamento dos resíduos sólidos vem se tornando cada vez mais atraente, uma vez que a geração de energia a partir da biomassa e outras fontes renováveis podem reduzir o consumo de combustíveis fósseis e com isso os impactos globais causados pela queima destes combustíveis, contribuindo para que a matriz energética seja mais sustentável (PECORA et. al., 2013).

Devido a esta tendência, se faz necessária à avaliação ambiental deste processo que deve ser feita através do levantamento dos impactos ambientais, compondo uma metodologia que vem sendo consolidada com o uso da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (SANTOS, 2002).

A Avaliação do Ciclo de Vida é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida (NBR 14.040, 2014).

Face a estas considerações, o objetivo do presente artigo é identificar os impactos ambientais do processo de destinação de RSU por meio da biodigestão anaeróbia para geração de energia, abordando principalmente a identificação os aspectos e impactos do

processo, utilizando ACV que possibilita essa análise pois considerando todas as etapas do ciclo de vida.

2. Cenário dos resíduos sólidos no Brasil

Os Resíduos Sólidos Urbanos, de acordo com a Lei Federal nº 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, são os resíduos domiciliares, isto é, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana (BRASIL, 2010).

O conhecimento da composição gravimétrica dos resíduos – porcentagem em relação a massa total de cada material constituinte dos resíduos – permite uma avaliação preliminar da degradabilidade, capacidade de contaminação ambiental, das possibilidades de reutilização, reciclagem, valorização energética e orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Sendo de grande importância na definição das tecnologias mais adequadas ao tratamento e disposição final dos resíduos (SOARES, 2011). A tabela a seguir (Tabela 1) apresenta a composição gravimétrica média dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.

Tabela 1: composição gravimétrica média dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Material	Participação (%)
Metais	2,9
Papel	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Matéria orgânica	51,4
Outros	16,7

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2011)

A geração de RSU no Brasil cresceu 1,3%, de 2011 para 2012, índice superior à taxa de crescimento populacional urbano no país no período, que foi de 0,9%. Quando comparada a quantidade total gerada e o total de resíduos sólidos urbanos coletados observa-se que 6,2 milhões de toneladas de RSU não foram coletados no ano de 2012 e, conseqüentemente, foram destinados de forma inadequada (ABRELPE, 2013). O crescimento da produção do lixo ocorre não só no Brasil, mas em todos os países, e está diretamente relacionado ao Produto Interno Bruto – ou seja, países mais ricos produzem mais lixo – e ao porte das cidades. No Brasil, entre 1992 e 2000 a população cresceu em 16%, enquanto a geração de resíduos sólidos domiciliares cresceu em 49% (RIBEIRO e BESEN, 2007).

Em 2012 58% dos resíduos foram destinados de forma adequada. Contudo, é importante ressaltar que os 42% restantes correspondem a 76 mil toneladas diárias, foram encaminhadas a lixões ou aterros controlados, que não possuem sistemas e medidas de proteção ambiental. Apesar da aplicação de uma legislação mais restritiva e dos esforços governamentais, a destinação inadequada de RSU acontece em todas as regiões e estados brasileiros, mais especificamente em 3.352 municípios, correspondentes a 60,2% do total, que ainda fizeram uso de locais impróprios para destinação final dos resíduos coletados, a maioria deles com menos de 10.000 habitantes e ainda sem condições técnicas e financeiras de solucionar esse problema (ABRELPE, 2013).

O Estado de São Paulo vem melhorando seu desempenho em relação ao tratamento e à disposição de resíduos sólidos domiciliares. Isto pode ser comprovado se observarmos a evolução, desde 1997, do Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos – IQR, que era de 4 e passou a 9,01, em uma escala que varia de 0 a 10. Porém, a gestão dos resíduos

sólidos não pode ser resumida somente à qualidade da disposição final. Hoje, os princípios da Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei Estadual nº 12.300/2006 - regulamentada pelo Decreto nº 54.645 de 05 de Agosto de 2009), como reduzir a geração de lixo, reutilizar materiais quando possível e reciclá-los passaram a integrar a agenda do Estado, trazendo novos desafios ao poder público e uma visão mais ampla da gestão de resíduos sólidos (SÃO PAULO, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que a gestão e gerenciamento de resíduos, deve ser fundamentada em: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólido se disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos - resíduos sólidos sem possibilidade de tratamento e recuperação tecnológica e economicamente viável. Prevendo a utilização de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos, quando comprovadamente seguras nos âmbitos operacionais, ambientais e ocupacionais. Com isso, verifica-se que reciclagem e recuperação energética não são tecnologias concorrentes e sim complementares. Os resíduos secos separados e coletados na fonte são aptos para reciclagem e devem ser encaminhados nesse sentido; e para os demais resíduos, coletados misturados e contaminados com as frações orgânicas, a forma mais eficiente de destinação é a recuperação energética (ABRELPE, 2012).

3. Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é definida como processo biológico onde a matéria orgânica é degradada em ambiente anaeróbio e sem luz, e transformada em metano e dióxido de carbono (AUGUSTO, 2007).

De acordo com Chernicharo (1997), a digestão da matéria orgânica em ambientes anaeróbios se dá por processos metabólicos complexos de fermentação e respiração, que ocorrem em etapas sequentes com pelo menos três grupos de microrganismos: bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas, e microrganismos metanogênicos. Resumidamente as bactérias fermentativas acidogênicas convertem por hidrólise e fermentação os compostos orgânicos complexos em compostos mais simples. Os microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. E finalmente, microrganismos denominados arqueas metanogênicas convertem o acetato e hidrogênio em metano e dióxido de carbono. Durante o processo de hidrólise os materiais orgânicos particulados, polímeros complexos como carboidratos, proteínas e lipídios, são convertidos em materiais dissolvidos mais simples através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Os produtos resultantes do processo de hidrólise, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, são metabolizados no interior das células, por fermentação, produzindo diversos compostos mais simples como ácidos orgânicos, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio, além de novas células bacterianas.

Os compostos orgânicos intermediários são oxidados pelas bactérias acetogênicas e convertidos de propionato e butirato, por exemplo, por substratos apropriados para os organismos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, os microrganismos metanogênicos anaeróbios estritos convertem estes compostos em metano (CHERNICHARO, 1997).

Além dos processos citados, durante a digestão anaeróbia pode ocorrer ainda a fase de redução de sulfatos e formação de sulfetos. Isso ocorre quando o substrato possui concentrações elevadas de sulfato e outros compostos à base de enxofre que são utilizados como aceptores de elétrons pelas bactérias sulforredutoras (CHERNIHARO, 1997).

Segundo Augusto (2007), a redução do sulfato é um processo indesejável, pois a matéria orgânica oxidada deixa de gerar metano e passa a gerar gás sulfídrico, que é corrosivo e possui odor desagradável.

A digestão anaeróbia possibilita soluções para diversos problemas ambientais contemporâneos, como por exemplo a geração de energia alternativa, tratamento de dejetos humanos e animais, tratamento de rejeitos municipais e industriais e controle de poluição (JORGE, 2004).

A digestão anaeróbia se dá naturalmente em diversos ambientes, como pântanos, sedimentos de rios, lagos e mares, minas de carvão, no trato digestivo de animais, etc. Contudo esta pode ocorrer dentro de reatores onde apresenta maiores taxas de geração de metano e maior facilidade operacional para recuperação do biogás (AMARAL, 2004).

Segundo Filizola, Leite e Prasad (2006), biodigestão anaeróbia da fração orgânica putrecível em biodigestores, quando bem operados, não causa problemas com odores e fornece melhores condições operacionais, quando comparados aos aterros sanitários. Porém, apresenta como desvantagem o longo tempo de detenção para a bioestabilização do material. Uma solução proposta para este problema é a utilização de inóculo, como por exemplo lodo de esgoto sanitário e esterco bovino, que são ricos em bactérias anaeróbias e aceleram o tempo de bioestabilização.

Neste contexto Leite e Povinelli (1999), considera biodigestão anaeróbia da fração orgânica putrecível dos RSU com alta taxa de sólidos e com uso de inóculos como lodo, uma alternativa promissora para o tratamento destes resíduos levando em consideração aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

Para Souza et. al. (2012), os reatores anaeróbios criam condições propícias para a biodigestão anaeróbia, gerando gás passível de ser utilizado como fonte alternativa de energia e com tempo de permanência baixo, cerca de 90 dias, se comparado aos aterros sanitários onde os resíduos permanecem por décadas.

O sistema mais apropriado depende das características dos resíduos, da área disponível, dos recursos financeiros e operacionais, da importância da geração de energia para o sistema, prevenção a poluição, e entre outros fatores (AMARAL, 2004).

O tratamento biológico anaeróbio do RSU demanda controle rígido de parâmetros como temperatura e pH, e também dos macro e micronutrientes que podem interromper o metabolismo do processo biológico. Além disso, a composição pouco homogênea do RSU torna o tratamento biológico dependente da separação dos resíduos orgânicos dos demais componentes, seja por via mecânica, com custo e eficiência associados, ou através de separação na fonte, que não é realidade nas maiorias das cidades brasileiras (MENEZES, 2013).

Menezes (2013) observa ainda que, embora haja o domínio técnico e empresas preparadas para oferecer produtos ao mercado de recuperação energética de RSU, há necessidade de fortalecimento no campo Institucional e Organizacional para que o mercado efetivamente se estabeleça.

Além disso, fatores culturais como, falta de mão de obra adequada, dificuldades de armazenamento do biogás e do biofertilizante e a localização distante das áreas de consumo do gás e do biofertilizante podem justificar o fracasso dos biodigestores no Brasil se comparado a países como China, Índia e Tailândia (JORGE, 2004).

4. Avaliação do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser considerada uma ferramenta muito importante pois busca soluções para problemas ambientais incluindo todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou processo, com o objetivo de estabelecer uma sistemática confiável que possa ser reproduzida a fim de possibilitar a decisão dentre várias atividades, por aquela com menor impacto ambiental. Esta avaliação leva em consideração as cargas ambientais associadas a um produto, processo ou atividade através da identificação, quantificação e avaliação de impactos quanto ao uso de energia, matéria e de emissões ambientais, e ainda a determinação de oportunidades de melhorias ambientais, incluindo todo o ciclo de vida do produto, processo ou atividade,

envolvendo extração e processamento de matérias-primas; fabricação, transporte, e distribuição; uso/reuso/manutenção; reciclagem; e disposição final (HINZ, VALENTINA e FRANCO, 2006).

Neste contexto, a ACV vai além da visão focada apenas no processo produtivo, tratamento e disposição dos dejetos gerados, para uma visão holística de todos os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida. A partir dessa metodologia pode-se verificar que a prevenção à poluição é alternativa mais viável, econômica e efetiva se comparada às ações sobre os efeitos gerados (HINZ, VALENTINA e FRANCO, 2006).

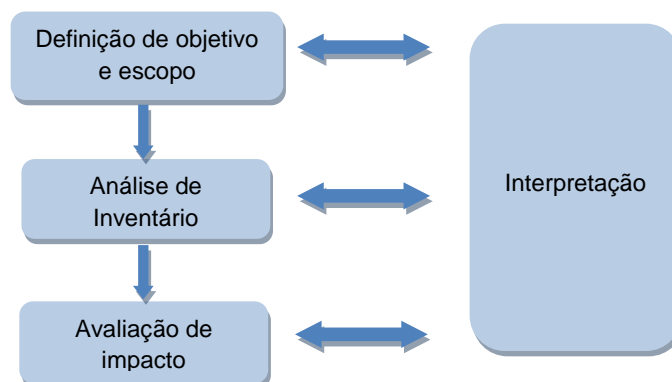
De acordo com Santos (2002), no fim da década de 90 começaram a surgir as primeiras normatizações sobre a ACV, resultado dos esforços internacionais para normatizar seus princípios e técnicas. A norma ISO 14040 (2009), padronizou e estabeleceu internacionalmente a definição para Avaliação do Ciclo de Vida, como sendo: a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida.

A norma ABNT ISO 14040 (2014), padronizou e estabeleceu internacionalmente a definição para Avaliação do Ciclo de Vida, como sendo: a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida.

A ACV surgiu do interesse no desenvolvimento de métodos para a melhor compreensão dos impactos associados aos produtos, e subsidiar a identificação de oportunidades para melhoria do desenvolvimento e aperfeiçoamento ambiental do produto, informações aos tomadores de decisão e na elaboração de políticas públicas, planejamento estratégico, seleção de indicadores ambientais e marketing do produto (ISO 14040, 2009).

De acordo com a Norma ISO 14040 (2014), a ACV é definida em quatro fases, são elas: Definição de Objetivo e Escopo, Análise de inventário, Avaliação de Impactos e Interpretação, conforme esquema (Figura 1).

Figura 1: Etapas de uma Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: ISO 14040 (2014)

Segundo Sanches (2011), as quatro fases em que a ACV é dividida são interdependentes, sendo possível o retorno a uma delas em qualquer momento do estudo.

Na primeira fase, "Definição de Objetivo e Escopo" são estabelecidas a finalidade do estudo e sua amplitude, isto envolve a decisão de fatores importantes para a pesquisa como as fronteiras, unidade funcional, estimativas e limitações, requisitos de dados, métodos de alocação e as categorias de impactos que serão consideradas na análise (COLTRO, 2007).

Durante a definição do escopo do estudo de ACV são estipuladas as diversas variações possíveis do sistema. Em função disso, é definida a unidade funcional. A unidade funcional é definida como unidade de referência quantitativa para o estudo a qual todos os fluxos de entrada e saída na ACV estão relacionados, por exemplo, 1 kg de café pronto para distribuição, esta é a unidade funcional e todas as entradas e saídas do processo de produção estão em função de 1 kg de café (COLTRO, 2007).

De acordo com a NBR 14040 (2014), o objetivo da unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas, de forma a assegurar a compatibilidade dos resultados da ACV.

Segundo Coltro (2007), a fronteira do sistema estabelece os limites para o estudo, ou seja, os processos elementares. Sua definição pode considerar diferentes dimensões, como: sistemas naturais, geográfica, temporais, sistema técnico de produção com um ou mais produtos.

O estabelecimento da fronteira é realizado no início da ACV, na fase de "Definição do Objetivo e Escopo", mas esta só será concluída após a coleta de dados suficientes para o estudo na análise de inventário, pois esta poderá ser alterada e se alguma parte do ciclo de vida não for estudada isto deve ser exposto no relatório (COLTRO, 2007).

O estabelecimento de requisitos de qualidade dos dados são importantes para a confiabilidade dos resultados e compreensão do estudo (NBR 14040, 2014).

Na fase de "Análise de Inventário" são levantadas informações sobre o produto, e as entradas e as saídas consideráveis são quantificadas. Nesta fase é elaborado um fluxograma do sistema para que fique bem definido os dados de consumo de recursos naturais e energia, produtos e co-produtos, e as emissões para o ar, água e solo. Posteriormente estes dados são compilados e as cargas ambientais são calculadas e relacionadas à unidade funcional (COLTRO, 2007).

Para a avaliação das emissões e resíduos gerados durante o ciclo de vida de um produto é necessário um grande número de informações, algumas delas podem estar disponíveis em banco de dados. Existem softwares que apresentam modelos para a ACV, desenvolvidos para auxiliar nos cálculos dos impactos ambientais gerados relativos ao ciclo de vida. Contudo, como são necessárias muitas informações para a realização do estudo, e nem sempre todas são encontradas em um único modelo, o estudo de ACV acaba se tornando extremamente complexo (HINZ, VALENTINA e FRANCO, 2006).

No entanto, existem também os bancos de dados, utilizados por esses softwares, que fornecem informações sobre diversos processos. Porém, não existem inventários de dados brasileiros publicados na literatura, e ao realizar um ACV em regiões diferentes a qual foi construído o inventário do processo no banco de dados, se faz necessária avaliação da aplicabilidade desses dados na região, considerando as similaridades e diferenças dos aspectos geográficos e tecnológicos locais (ARAÚJO, 2013).

O uso de softwares para ACV auxilia na execução do estudo, principalmente na análise do inventário de ciclo de vida, o processamento dos dados ocorre de forma mais fácil, imparcial e rápida, além de garantir a confiança nos cálculos resultando em relatórios finais de maior consistência. Com isso, facilitam o gerenciamento dos dados envolvidos no estudo, pois disponibilizam bancos de dados, realizam avaliação de impacto e interpretação, são atualizadas regularmente e apresentam os resultados através de gráficos e tabelas (RODRIGUES et. al., 2008).

O Software SimaPro 7.2 cujo programa é utilizado por usuários em mais de 80 países. É uma ferramenta para coletar dados e analisar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços, seguindo as recomendações da série ABNT ISO 14040. Foi lançado em 1990 e constitui uma ferramenta confiável e flexível usada pelas grandes indústrias, consultorias e universidades (ACV BRASIL, 2014).

Ainda nesta fase, pode ser aplicada a metodologia de alocação, método que consiste em dividir as cargas ambientais de um processo entre os seus produtos. Isso ocorre quando o ciclo de vida de produtos diferentes são interligados, por exemplo, a produção de leite e queijo, de óleo diesel e gasolina. Nestas situações é recomendado que a fronteira seja ampliada de forma que os co-produtos sejam incluídos no estudo (COLTRO, 2007).

Na fase de "Avaliação dos Impactos", as informações geradas na Análise de Inventário são associadas aos impactos ambientais, possibilitando a avaliação da significância e potencial do impacto (COLTRO, 2007).

O objetivo da avaliação de impacto da ACV é estudar a significância dos impactos ambientais potenciais utilizando os resultados da Análise de Inventário associando-os à categorias de impactos específicas. Esta fase também fornece informações para subsidiar a fase de interpretação do ciclo de vida (NBR 14040, 2014).

A Avaliação de Impactos segundo a NBR 14040 (2014), deve apresentar a seleção de categorias de impacto, a classificação (relação entre os resultados do Inventário e as categorias) e a caracterização (cálculo dos resultados através da multiplicação dos fatores de equivalência). São apresentados como elementos opcionais a normalização (análise da magnitude dos resultados através de informações de referência), agrupamento de categorias de impacto, ponderação com pesos para diferentes categorias de impactos e análise da qualidade dos dados.

São exemplos de impactos associados aos dados, acidificação, eutrofização, mudanças climáticas, etc. Primeiramente os dados do inventário são selecionados e atribuídos a categorias de impactos, feito isto, na caracterização os dados são multiplicados pelos fatores de equivalência para cada categoria de impactos, por exemplo, 1 kg N₂O é equivalente à emissão de 296 kg de CO₂ e 1kg de CH₄ é equivalente a 23 kg de CO₂ (COLTRO, 2007).

Na fase de "Interpretação" são avaliados em conjunto os resultados obtidos na Análise de Inventário e na Avaliação de Impactos, o que se espera é que esta avaliação apresente resultados consistentes com o objetivo e escopo, que possam explicar limitações e subsidiar conclusões e recomendações (NBR 14040, 2014).

A metodologia de ACV, quando focada em produto, fornece informações a respeito das interações significativas entre o sistema do produto e o meio ambiente. Analisando a ACV como ferramenta de obtenção e compilação de informações é possível estabelecer outras funcionalidades, como a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho através da identificação das principais contribuições aos impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de produto, subsidiando ações de planejamento direcionadas à minimização dos aspectos; e comparação ambiental entre produtos ou processos de função equivalente onde é possível realizar a avaliação de quais os aspectos ambientais são mais significativos e quais os potenciais impactos respectivos, entre diferentes formas de cumprir uma determinada função (RIBEIRO, 2003).

Nestas duas vertentes apresentadas são diversas as aplicações da ACV, e cada tipo de usuário aplica a metodologia para suas necessidades específicas (RIBEIRO, 2003). Dessa forma, pode-se afirmar que a ACV é uma metodologia de apoio para a tomada de decisão quanto aos aspectos e impactos ambientais, pois entre outras aplicações contribui para a solução de questões ecológicas através de uma metodologia bem definida (HINZ, VALENTINA e FRANCO, 2006).

Sendo assim, a ACV pode ser uma importante ferramenta de planejamento, tomada de decisões e melhoria de um sistema para a gestão de resíduos sólidos. Neste contexto, a ACV gera dados para orientação do gerenciamento, listando o consumo de energia e emissões para o ar, água e solo e prevendo a quantidade de produtos que podem ser gerados a partir do resíduo sólido (composto orgânico, materiais secundários para a reciclagem mecânica e energia utilizável). Através da ACV é possível avaliar todas as atividades envolvidas com o manejo de resíduos (segregação, coleta, transporte,

tratamentos, disposição) e escolher o conjunto de atividades que minimize os impactos ambientais (SÃO PAULO, 2010).

5. Material e Método

A metodologia para a elaboração desta pesquisa primeiramente consistiu no levantamento de pesquisa bibliográfica, em busca de subsídio para o entendimento do processo de destinação de RSU por meio da biodigestão anaeróbia, bem como da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Após o levantamento bibliográfico, foi iniciado estudo do processo de tratamento de resíduos estudados associados à geração de energia e com aplicação da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida, seguindo os princípios e a estrutura apresentados na ABNT ISO 14040.

A ACV foi realizada com o uso do Software SimaPro 7.2 este software foi escolhido para desenvolvimento do estudo, pois o Centro Universitário SENAC possui a licença educacional do mesmo, o que facilitou o seu desenvolvimento. E o banco de dados utilizado para a realização da ACV foi o Ecoinvent data 2.1, disponível no próprio Software SimaPro.

Não existem inventários de dados brasileiros sobre tecnologias de tratamento de resíduos, bem como sobre outros processos e produtos, com exceção dos dados existentes sobre a matriz energética, publicados na literatura. Ao realizar um ACV em regiões diferentes a qual foi construído o inventário do processo no banco de dados, se faz necessária avaliação da aplicabilidade desses dados na região, considerando as similaridades e diferenças dos aspectos geográficos e tecnológicos locais (ARAÚJO, 2013). Dessa forma, o estudo almejou realizar uma análise do desempenho ambiental do processo estudado, com base nos dados secundários do banco de dados Ecoinvent, que não representam um cenário especificamente brasileiro.

Na análise de inventário dos processos no software houve necessidade de ajustar alguns dados das entradas de acordo com a unidade funcional e os fatores de conversão aplicáveis ao cenário brasileiro. Para tal foram necessários cálculos para compatibilização dos dados, tomando como base a unidade funcional de 01 tonelada de RSU, porcentagem de orgânicos, porcentagem de fase úmida entre outras. Desta forma, para 1 tonelada de resíduos foi considerado 0,5 tonelada de resíduos orgânicos (50%), conforme composição gravimétrica dos RSU do Brasil apresentada no item 4.1 – Cenário dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, passíveis de serem biodegradados, sendo a outra metade encaminhada para disposição em aterro sanitário. A biodegradação de 0,5 tonelada de resíduos orgânicos no biodigestor gera 70m³ de biogás, que é encaminhado a um processo de purificação para extração do gás metano que representa 40m³ do volume do biogás (SOARES, 2013a). O metano extraído do biogás é encaminhado à unidade de cogeração para gerar energia elétrica, que para este volume de gás metano corresponde a 80 kWh (SOARES, 2013b). Além disso, foi realizada uma ponderação durante a inserção na construção do aterro no fluxo de atividades a serem consideradas, de modo que esses impactos não fossem associados a unidade funcional, pois estes impactos devem ser distribuídos a sua capacidade total de aterramento.

Na sequência, foi realizada a análise dos impactos ambientais do processo de tratamento de resíduos associado à geração de energia, no software SimaPro que foi aplicada a metodologia Norte Americana TRACI - Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (Ferramenta para a Redução e Avaliação de Química e outros impactos ambientais), esta metodologia foi escolhida pois apresenta categorias de impactos bastante presentes no Brasil. São elas: aquecimento global (global warming), acidificação (acidification), saúde humana carcinogênicos (carcinogenic), saúde humana não carcinogênicos (non-carcinogenic), efeitos

respiratórios (respiratory effects), eutrofização (eutrophication), depleção do ozônio (ozone depletion), ecotoxicidade (ecotoxicity) e poluição (smog).

Os resultados estão demonstrados em impactos de curto e longo prazos, sendo que os de curto prazo representam emissões de poluentes que persistem em tempo menor do que 100 anos, enquanto que os de longo prazo representam emissões de poluentes que persistem em mais de 100 anos.

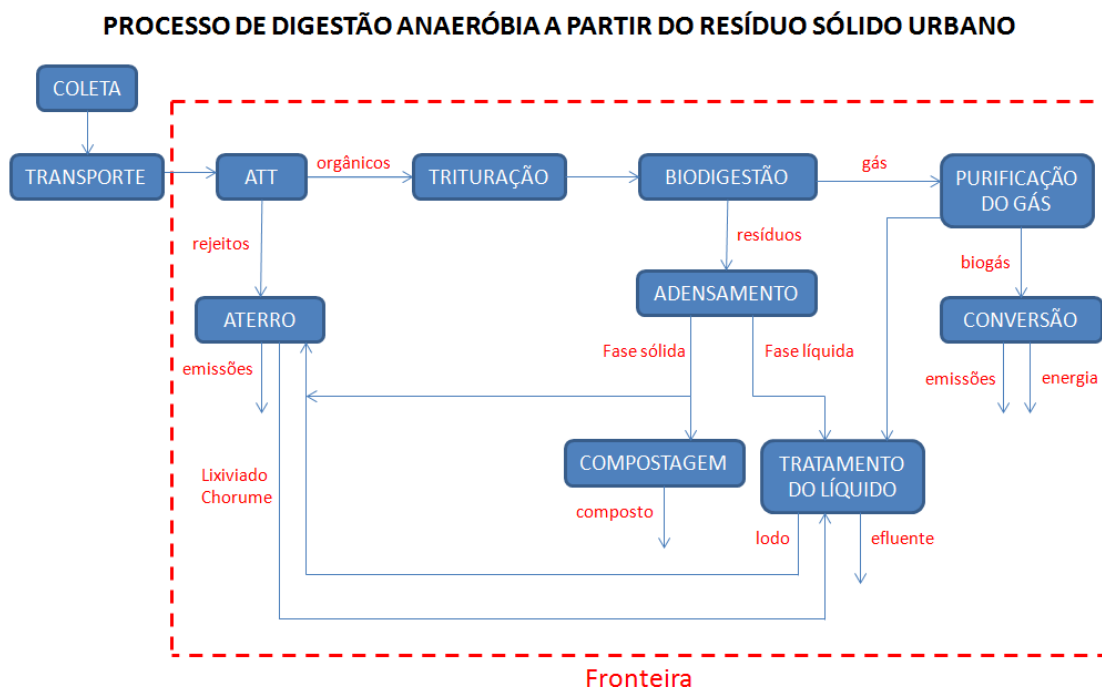
6. Resultados e discussão

A metodologia para obtenção dos resultados da ACV para os processos de biodigestão anaeróbia seguiu-se em conformidade com a norma NBR ISO 14040 (2014).

A fronteira adotada para o estudo contemplou os processos envolvidos a partir da triagem e preparação dos resíduos antes de serem encaminhados ao reator anaeróbio. Desta forma, os processos predecessores, como coleta e transporte dos resíduos, não foram incluídos neste estudo. A fronteira adotada pode ser visualizada no fluxograma (Figura 02), baseado nas referências bibliográficas encontradas e no banco de dados utilizado, com as etapas envolvidas, entradas e saídas incluindo as emissões do processo.

No processo de biodigestão foram consideradas as etapas de pré-tratamento, digestão dos resíduos orgânicos e o pós-tratamento do material digerido, incluindo as emissões com o seu uso no solo como fertilizante, e do líquido gerado durante o adensamento, a unidade de purificação do biogás e a unidade de cogeração. Os rejeitos segregados na ATT, bem como nos processos posteriores, são destinados à disposição em aterro sanitário, o qual possui sistema de captação do lixiviado e dos gases gerados. O banco de dados Ecoinvent considera as características para as unidades e atividades que compõe o sistema presentes na Suíça.

Figura 2: Fluxograma do processo e fronteira do estudo para biodigestão

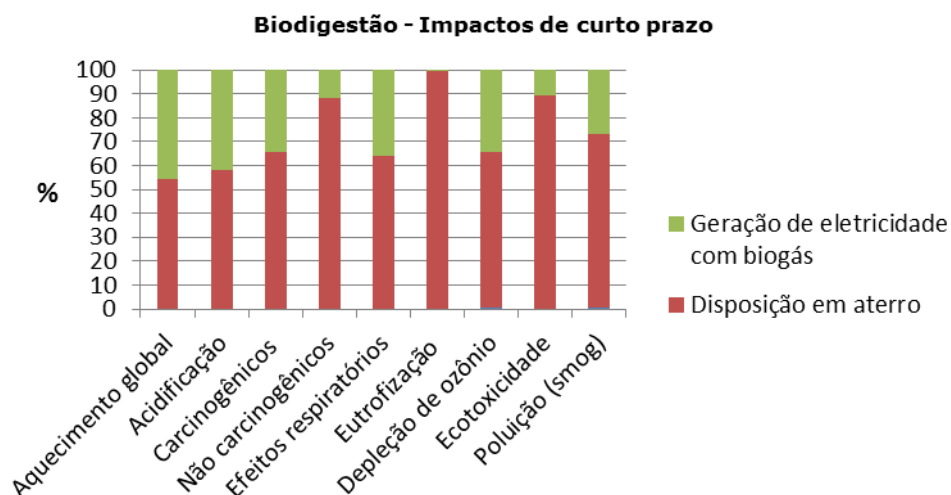


* ATT - Área de Triagem e Transbordo

Os resultados obtidos apresentam os impactos em percentual de contribuição de cada etapa do processo para cada categoria de impacto. A Figura 3 apresenta os resultados

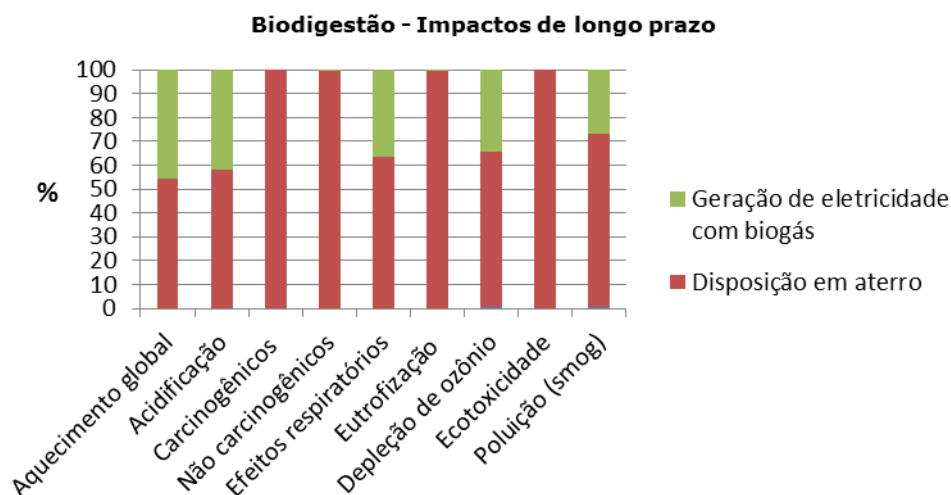
dos impactos considerando as emissões de curto prazo, onde, é possível verificar que a disposição em aterro foi a etapa mais representativa nas categorias de impactos avaliadas. Principalmente na categoria "eutrofização" causada pelas emissões de nutrientes em corpos d'água, em seguida aparecem as categorias "ecotoxicidade" e "não carcinogênicos", impactos estes que podem ser relacionados a contaminações do solo e lençol freático por provável falha no sistema de proteção.

Figura 3: Resultado da ACV por categoria de impacto para biodigestão em curto prazo



Os dados da variação dos resultados quando são considerados os impactos das emissões de longo prazo estão apresentados na figura 4.

Figura 4: Resultado da ACV por categoria de impacto para biodigestão em longo prazo



A disposição em aterro continua sendo a etapa mais impactante, em todas as categorias de impactos avaliadas. Contudo, são nas categorias de "carcinogênicos", "não carcinogênicos", "eutrofização" e "ecotoxicidade" que os impactos são predominantes para esta etapa, impactos estes que podem ser relacionados a contaminações do solo e lençol freático por provável falha no sistema de proteção, por exemplo. O aumento desses impactos para a etapa de disposição em aterro, quando consideradas as

emissões de longo prazo, pode estar relacionado com as emissões de substâncias cumulativas e/ou persistentes, que ao serem emitidas por longo período afetam a saúde humana e os recursos naturais.

No entanto, analisando os resultados em números absolutos, é possível visualizar com melhor detalhe estas diferenças (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2: Resultados para biodigestão – curto prazo

Categoria de impacto	Unidade	Aterro Sanitário	Disposição em aterro	Geração de eletricidade	TOTAL
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	0,0617	21,5	18,1	39,6617
Acidificação	H ⁺ mols eq	0,0214	4,33	3,13	7,4814
Carcinogênicos	kg benzeno eq	0,0000443	0,022	0,0114	0,033444
Não carcinogênicos	kg tolueno eq	0,227	219,00	29,9	249,127
Efeitos respiratórios	kg PM ¹ 2.5 eq	0,0000696	0,015	0,00854	0,02361
Eutrofização	kg N eq	0,0000416	0,694	0,00415	0,698192
Depleção de ozônio	kg CFC-11 ² eq	0,0000000223	0,00000169	0,000000887	0,0000026
Ecotoxicidade	kg 2,4-D ³ eq	0,00849	8,74	1,05	9,79849
Poluição (smog)	G NOx eq	0,000439	0,061	0,0225	0,083939

Tabela 3: Resultados para biodigestão – longo prazo

Categoria de impacto	Unidade	Aterro Sanitário	Disposição em aterro	Geração de eletricidade	TOTAL
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	0,0617	21,5	18,1	39,6617
Acidificação	H ⁺ mols eq	0,0214	4,33	3,13	7,4814
Carcinogênicos	kg benzeno eq	0,0000733	87,9	0,0567	87,9568
Não carcinogênicos	kg tolueno eq	0,686	2850000	1330	2851330,69
Efeitos respiratórios	kg MP 2.5 eq	0,000069	0,0151	0,00864	0,0238
Eutrofização	kg N eq	0,0000809	3,39	0,0119	3,4019
Depleção de ozônio	kg CFC-11 eq	0,0000000223	0,00000169	0,000000887	0,0000026
Ecotoxicidade	kg 2,4-D eq	0,042	19700	22,1	19722,142
Poluição (smog)	G NOx eq	0,000439	0,061	0,0225	0,0839

Analisando desta forma, é possível verificar que há um aumento considerável dos resultados de curto prazo para os de longo prazo nas categorias carcinogênicos, não carcinogênicos e ecotoxicidade. Isto deve-se aos efeitos de substâncias tóxicas, cumulativas e persistentes, consideradas para essas categorias, que representam risco a

¹MP – Material Particulado

²CFC-11 – clorofluorcarboneto:triclorofluorometano

³2,4-D – ácido diclorofenóxiacético

saúde humana, a fauna e a flora, sendo impactos esses agravados quando consideradas as emissões de longo prazo devido suas características cumulativas.

É possível observar também que, em todas as categorias de impacto a etapa que mais contribui é a disposição em aterro, o que está associado aos impactos que podem ocorrer em decorrência das emissões de longo prazo, tendo em vista que os rejeitos depositados nos aterros passam muitos anos em atividades de decomposição, gerando compostos que podem interagir com o meio ambiente, acarretando nestes impactos.

Os impactos da etapa de construção do aterro sanitário são menos expressivos, quando comparados aos demais, isso acontece, pois durante a análise de inventário foi feita uma ponderação, para que todo impacto da instalação da infraestrutura do aterro não fosse considerado para a unidade funcional, tendo em vista que o aterro é construído para 30 anos de operação e o impacto de sua instalação deve ser distribuído e considerado para todo material a ser depositado.

7. Conclusões

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta importante permite a avaliação de um produto ou processo em busca de soluções para problemas ambientais incluindo todas as etapas do ciclo de vida, possibilitando a análise e decisão dentre várias atividades, por aquela com menor impacto ambiental.

Para o processo de biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica, a aplicação da ACV permitiu verificar que o entre as categorias de impacto a etapa que mais contribui é a disposição em aterro, que está associado aos impactos que podem ocorrer em consequência das emissões de longo prazo, tendo em vista que os rejeitos depositados nos aterros passam muitos anos em atividades de decomposição, gerando compostos que podem interagir com o meio ambiente, acarretando nestes impactos.

Foi possível verificar um aumento considerável dos resultados de curto prazo para os de longo prazo nas categorias carcinogênicos, não carcinogênicos e ecotoxicidade. O que pode ser atribuído aos efeitos de substâncias tóxicas, cumulativas e persistentes, consideradas para essas categorias, que representam risco a saúde humana, a fauna e a flora, sendo impactos esses agravados quando consideradas as emissões de longo prazo devido suas características cumulativas.

De forma geral, o eficaz gerenciamento dos resíduos deve ser fundamentado na combinação de diversas tecnologias, buscando atender as demandas e especificidades de cada área e/ou setor. Portanto, recomenda-se, a utilização das tecnologias de recuperação energética, tais como, incineração, biodigestão e captação e utilização de biogás de aterros, associados à reciclagem, de forma a integrar seu objetivo principal, de tratamento dos resíduos à geração de energia elétrica.

Sendo assim, os RSU devem deixar de ser tratados apenas como um problema ambiental e passarem a serem considerados como alternativa para a geração de energia elétrica. Haja vista que, a recuperação energética é hoje uma realidade em outros países e importante alternativa no gerenciamento dos RSU, que deve ser considerada pelos municípios quando da elaboração dos seus planos de gestão integrada de resíduos, visando um futuro mais sustentável.

Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012 - Edição Especial 10 anos**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2013.

ACV BRASIL. **Simapro**. Disponível em: <<http://www.acvbrasil.com.br/simapro/>>. Acesso em: 17 de Abril de 2014.

AMARAL, Fernando Merli. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, 2004.

ARAÚJO, Marcelo Guimarães. **Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil**. Dissertação (Doutorado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura**: NBR ISSO 14040, Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura**: NBR ISSO 14040, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014.

AUGUSTO, Kardina Von Zuben. **Caracterização quantitativa e qualitativa dos Resíduos em sistemas de produção de ovos: Compostagem e biodigestão anaeróbia**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Jaboticabal, 2007.

BAIRD, Colin. **Química Ambiental**; trad. Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera – 2º Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2002.

BRASIL (país). **Lei Federal nº 12.305/10** - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, 2010.

CETESB (São Paulo). **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2012** [recurso eletrônico] / CETESB: coordenação Cristiano KenjiIwai; equipe técnica Maria Heloisa P. L. Assumpção... [et. al.]. São Paulo: CETESB, 2013.

CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1997.

COLTRO, Leda. **Avaliação do Ciclo de Vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA, 2007.

FILIZOLA, C. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S. Estudo do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. **Agropecuária Técnica** - v.27, n.1, P. 53-62 — Areia, PB, CCA/UFPB, 2006.

HINZ, Roberta Tomasi Piris; VALENTINA, Luiz V. Dalla; FRANCO, Ana Claudia. Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela Avaliação do Ciclo de Vida. **Estudos tecnológicos** - Vol. 2, nº 2:91-98, jul/dez. 2006.

JORGE, Leila Cristina. **Estudo de viabilidade de implementação de biodigestores anaeróbios no município de Paty do Alferes – RJ, uma contribuição para minimizar a degradação ambiental na área rural**.

Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Universidade Federal Fluminense - UFF, Rio de Janeiro, 2004.

LEITE, Valderi Duarte; POVINELLI, Jurandyr. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.229-232, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 1999.

MENEZES, Wallace Fernandes. **Avaliação tecnológica de geração energética com Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas – EESP – FGV, São Paulo, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos** (versão preliminar para consulta pública). Brasília, 2011.

MOURAD, Anna Lucia; GARCIA, Eloísa Elena Corrêa; VILHENA, Andre. **Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e aplicações**. Campinas: CETEA, Co-edição: CEMPRE, 2002.

PECORA, Vanessa; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González; COELHO Suani Teixeira. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo**. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/congbioen_pecora.pdf>. Acesso em: 20 de Abril de 2013.

RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: primeira aproximação**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, 2003.

RIBEIRO, Helena; BESEN, Gina Rizpah. Panorama da coleta seletiva no Brasil: desafios e perspectivas a partir de três estudos de caso. **INTERFACEHS Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente** - v.2, n.4, Artigo 1, ago 2007.

RODRIGUES, Carla Regina Blanski, ZOLDAN, Marcos Aurélio, LEITE, Magda Lauri Gomes, OLIVEIRA, Ivani Luiz. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). In: **Anais do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável**. Rio de Janeiro, 13 a 16 de outubro de 2008.

SANCHES, Roberta. **A Avaliação de Impacto Ambiental e as Normas de Gestão Ambiental da Série ISO 14000: caracterização técnicas, comparações e subsídios à integração**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

SANTOS, Luciano Miguel Moreira. **Avaliação ambiental de processos industriais**. – Ouro Preto: ETFOP, 2002.

SANTOS, Guilherme Garcia Dias. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SÃO PAULO (Estado) Secretaria do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos** / Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Coordenadoria de Planejamento Ambiental; autores: Mansor, Maria Teresa C.; Camarão, Teresa Cristina R. Costa; Capelini, Márcia;

Kovacs, André; Filet, Martinus; Santos, Gabriela de A.; Silva, Amanda Brito - São Paulo: SMA, 2010.

SISINNO, Cristiana Lucia Silveira. **Resíduos Sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2000.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SOARES, Fabio Rubens. **Dados referentes à biodigestão obtidos durante visita técnica realizada na planta de biodigestão anaeróbia de resíduos Sobacken em Boras na Suécia**. 2013a.

SOARES, Fabio Rubens. **Dados referentes à geração de energia com uso de biogás, obtidos durante visita técnica realizada no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo**. 2013b.

SOUZA, José; PELEGRINI, Leandro; MOTTA, Clayton André Oliveira, COELHO, Mário Augusto Alexandre, SCHAEFFER, Lirio. **Tratamento de resíduos urbanos, geração de energia e fertilizante: uma perspectiva para a região do Vale dos Sinos**. In: 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente - Bento Gonçalves – RS, Brasil, 25 a 27 de Abril de 2012.

Recebido em 09/02/15 e Aceito em 28/05/15.