

III-037 - MODELAGEM EM ACV PARA A ESCOLHA DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA UM MUNICÍPIO DE GRANDE PORTE

Artur Rech da Rosa⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental (UCS) e Mestrando em Engenharia e Ciências Ambientais (UCS)

Geraldo Antônio Reichert⁽²⁾

Engenheiro Civil (UFRGS), Mestre em Engenharia (UFRGS) e Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS)

Endereço⁽¹⁾: Rua Rodrigues Alves, 985 - Cruzeiro – Caxias do Sul - RS - CEP: 95076-670 - Brasil - Tel: +55 (54) 9 9198.2417 - e-mail: artur.eng2@gmail.com.

RESUMO

A geração de resíduos sólidos vem aumentando e tornou-se um grande problema ambiental, visto que seu mau gerenciamento pode gerar inúmeros impactos ambientais. Este artigo tem por objetivo comparar e analisar cenários de alternativas de gerenciamento e identificar qual deles é o mais sustentável quanto às categorias de indicadores ambientais avaliadas para o processo de destinação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de um município de grande porte no estado do Rio Grande do Sul, por meio do uso da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e do programa computacional IWM-2. Foram avaliados diferentes categorias de impactos: mudanças climáticas, toxicidade humana, foto-oxidação, acidificação, eutrofização e uso de energia, em três cenários distintos. Os indicadores de impacto do ciclo de vida foram avaliadas para as diferentes etapas que compõem uma alternativa ou uma rota tecnológica, como coleta, triagem, tratamento térmico, tratamento biológico, reciclagem e aterro sanitário. Conclui-se que a aplicação da ACV facilita o apoio à decisão em sistemas municipais de gestão de resíduos sólidos urbanos, sendo que, no caso em estudo, o cenário com menor impacto ambiental, ou seja, o mais sustentável, apresentou-se sendo o #3 (tratamento térmico) e o que causa maior impacto negativo foi o cenário #1 (aterro sanitário), que é o modelo de gestão utilizado atualmente.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos Urbanos, ACV, Gerenciamento, Modelagem, Cidade de Grande Porte

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A geração de resíduos e seu posterior abandono no ambiente podem criar sérios problemas ambientais, propiciando, por exemplo, a incorporação de agentes contaminantes na cadeia trófica interagindo em processos físico-químicos naturais, dando lugar à sua dispersão e, dessa forma, aumentando o comprometimento da qualidade ambiental (SCHNEIDER et al., 2001).

Particularmente em relação à problemática dos resíduos sólidos, a forma como estes vêm sendo dispostos no ambiente vem se tornando uma preocupação crescente e irreversível, como também é a geração de resíduos na sociedade moderna. Segundo Mol (2013), os produtos de uso único, a descartabilidade, a disponibilidade de inúmeros produtos cada vez mais atraentes, a obsolescência programada dos produtos à venda, entre outros fatores, levam a um consumo desenfreado. O grande impasse existente é como compatibilizar a geração desses resíduos com a capacidade de armazenamento e de suporte do ambiente.

Estes resíduos, quando não manejados de forma adequada, impactam o meio ambiente aumentando os riscos tanto à saúde humana quanto ambiental. Como solução para o manejo de resíduos, tem-se o gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos, sistema que engloba o fluxo de resíduos como um todo, incluindo os métodos de coleta, de tratamento e de disposição final, visando à otimização econômica, a aceitabilidade social e, principalmente, os benefícios ao meio ambiente (REICHERT; CASAGRANDE, 2014).

O planejamento sistemático do setor de resíduos sólidos por parte do poder público se torna ainda mais relevante com a aprovação da Lei Federal 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos

(BRASIL, 2010). Essa lei estabelece a priorização da reciclagem e do tratamento dos resíduos, destinando para aterros sanitários somente aqueles resíduos que não podem ser reaproveitados, os rejeitos, estabelecendo ainda a necessidade da comprovação da viabilidade técnica e ambiental de tecnologias de recuperação energética de resíduos (REICHERT; MENDES, 2014). Ressalta-se que a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seus objetivos, prioriza a ordem para os resíduos sólidos urbanos como: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento; e por fim, a disposição final adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Desta forma, busca alcançar todas as etapas do ciclo de vida dos produtos, desde a produção ao pós-consumo, e tenta atenuar as mudanças climáticas, criar um sistema ambientalmente sustentável, preservar a biodiversidade e os demais recursos naturais.

Assim, fica explícita a necessidade do estabelecimento de metodologias aplicáveis à realidade brasileira e que atendam aos princípios e objetivos dessa política, em especial a visão sistêmica da gestão dos resíduos e da sustentabilidade. Para a definição dos sistemas sustentáveis de manejo de resíduos, a montagem de cenários com diferentes propostas tem sido uma forma muito utilizada. Cenários de gerenciamento de resíduos são as diferentes alternativas de manejo dos resíduos possíveis de serem implementados, que podem incluir as etapas de coleta, transporte, triagem centralizada, reciclagem de materiais, tratamento biológico, tratamento térmico e aterro sanitário. Busca-se, nesses cenários, uma combinação de diferentes técnicas e tecnologias que resulte no sistema mais ambientalmente efetivo em termos de emissões gasosas, líquidas e de resíduo sólido final, em um custo mais viável e que seja socialmente aceitável pela população (REICHERT; MENDES, 2014).

Desta forma, para avaliar diferentes cenários propostos, a utilização da 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, processo ou atividade (extração e processamento de matérias-primas, fabricação, transporte, e distribuição, uso/reuso/manutenção, reciclagem e disposição final), 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 (SILVA; SOARES; SEO, 2015).

Desse modo, a ACV vai além da visão focada apenas no processo produtivo, tratamento e disposição dos resíduos 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 a alternativa mais viável, econômica e efetiva se comparada às ações sobre os efeitos gerados (HINZ; VALENTINA; FRANCO, 2006).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo comparar e analisar cenários, por meio da técnica de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, construídos para o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos do município de Porto Alegre – RS. Ainda, busca identificar qual o cenário mais sustentável quanto às categorias de indicadores ambientais avaliadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EM ACV

Os estudos em ACV tiveram início na década de 60, com a crise do petróleo, que levou a sociedade a se questionar sobre o limite da extração dos recursos naturais, especialmente de combustíveis fósseis e de recursos minerais. Os primeiros estudos tinham o objetivo de calcular o consumo de energia, ficando conhecidos como “análise de energia”. Logo após, dados sobre consumo de matérias-primas, de combustíveis e sobre os resíduos sólidos gerados começaram a ser contabilizados, ficando estes estudos conhecidos como “análise do perfil ambiental” (COLTRO, 2007).

Em 1993, a *International Organization for Standardization* – ISO, considerando a diversidade de aspectos que revelavam as inúmeras interações entre os processos e suas consequências de impacto ambiental (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos), criou um comitê técnico para elaborar normas de sistemas de gestão ambiental e suas ferramentas, publicando a série ISO 14.000, que inclui as normas de Avaliação do Ciclo de Vida (SANTOS, 2011). Sendo que a norma específica da ACV, no Brasil, foi publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no ano de 2009 sob o nome de “NBR ISO 14.040/2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura” que está em sua segunda edição e sofrendo uma atualização no ano de 2014.

A ACV surgiu como uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais de um sistema de produto, a partir da união de um inventário de entradas e saídas, desde a aquisição da matéria-prima na natureza até a disposição final, ou seja, “desde o berço ao túmulo do produto”. Além disso, a ACV veio para auxiliar na tomada de decisões para a identificação de oportunidades de melhoria do desenvolvimento e aperfeiçoamento ambiental do produto, informações aos tomadores de decisão e na elaboração de políticas públicas, planejamento estratégico visando à definição de prioridades, seleção de indicadores ambientais e no marketing do produto (ABNT, 2014). Ainda, algumas de suas vantagens incidem no fato de que a ACV permite desenvolver uma avaliação sistemática nas consequências ambientais de dado produto ou processo, quantificar descargas ambientais de cada etapa do ciclo de vida, analisar balanços ambientais específicos, avaliar os efeitos nos ecossistemas e saúde humana, comparação entre produtos ou processos e identificação dos impactos associados às áreas ambientais de interesse específico (US EPA, 2006).

Um estudo de ACV é dividido em quatro fases: a primeira é a Definição do Objetivo e Escopo, na qual são identificados e definidos o propósito do estudo e sua amplitude, envolvendo decisões importantes sobre as fronteiras, às unidades funcionais e os métodos de alocação e categorias de impactos utilizados. A fase seguinte é a de Análise do Inventário, na qual são levantadas, consideradas e quantificadas, de forma bem definida, as informações sobre o sistema do produto, as entradas e as saídas relevantes para o sistema. Na terceira fase, de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), os dados e as informações geradas na Análise de Inventário são associados a impactos ambientais específicos (como mudança climática, toxicidade humana), de modo que o significado desses impactos potenciais possa ser avaliado. Na última fase, de Interpretação, os resultados obtidos nas fases de Análise de Inventário e de Avaliação de Impacto são combinados e interpretados conforme a prévia definição dos objetivos do estudo (COLTRO, 2007).

A etapa de AICV consiste nos seguintes passos (REICHERT; MENDES, 2014):

- I. Seleção das categorias de impacto: consiste na escolha de indicadores relevantes às categorias e aos modelos para quantificar a contribuição das diferentes entradas e emissões em cada classe específica de impacto;
- II. Classificação: designação dos resultados do inventário às categorias de impacto;
- III. Caracterização: são realizados cálculos para avaliar a significância relativa de cada fator contribuinte ao impacto global do sistema em análise, convertendo-os em um indicador comum.

Ainda, na etapa de AICV podem-se incluir elementos opcionais, como a normalização, que consiste no cálculo da magnitude dos resultados do indicador da categoria em relação a um valor de referência, como o número total de entradas e saídas de certa área, que pode ser global, regional, nacional ou local (COLTRO, 2007) para facilitar sua comparação entre indicadores.

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, tornando-se uma técnica útil para o planejamento de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, especificamente usados para identificar os impactos ambientais globais ao longo da hierarquia de tratamento de resíduos (BARTON; DALLEY; PATEL, 1996), como 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 gerada). Desta forma, esta técnica vem sendo muito abordada por pesquisadores para modelar as opções de gestão de resíduos que vão desde a redução/minimização, coleta, valorização, tratamento ou destinação adequada dos resíduos sólidos (BANAR; COKAYGIL; OZKAN, 2009).

No Brasil, o número de estudos em ACV vem crescendo cada vez mais, sendo desenvolvidos em grande parte pela academia, em geral, pelos cursos de engenharia e por algumas indústrias que desejam melhorar o conhecimento de seu produto. Apresentando-se como uma importante ferramenta que auxilia na credibilidade do conceito das necessidades ambientais adequadas, conscientizando à sociedade e as indústrias e estimulando o desenvolvimento sustentável (ZOCHE, 2014).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada foi dividida em três passos. O primeiro consistiu na decisão de escolha dos 3 cenários de diferentes tecnologias para o gerenciamento de RSU de um município de grande porte no estado do Rio Grande do Sul – Brasil, descritos em Reichert (2013), sendo chamados de #1, #2 e #3.

O passo seguinte foi a aplicação da ferramenta de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) por meio do programa computacional IWM-2, apresentado por McDougall et al. (2001), gerando o inventário dos indicadores ambientais selecionados. Após, foi feita a classificação dos diversos poluentes de acordo com as categorias de impacto, ainda, os fatores de caracterização de cada um destes poluentes emitidos foi realizada embasando-se em Den Boer et al. (2005).

O terceiro passo foi a normalização dos indicadores de impactos para possibilitar a sua comparação dentre as categorias de impacto, conforme metodologia sugerida por Guinée et al. (2002) em relação ao mundo no ano de 1995. O último passo foi a consolidação final de todos os resultados da ICV dos cenários avaliados e a geração de gráficos para posterior avaliação.

3.1. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

No cenário #1 houve coleta de 410.047 t/ano de resíduos, sendo 350.871 t/ano de resíduos domésticos e 59.176 t/ano de resíduos gerados pelo comércio. Deste total, o município destina 31.402 t/ano dos resíduos para triagem, dos quais 23.197 t/ano são reaproveitadas e 8.205 t/ano são consideradas rejeitos e descartadas em aterro sanitário. Além disso, 13.423 t/ano de resíduos são destinadas ao tratamento biológico, no qual 5.925 t/ano são transformados em composto biológico, 5.035 t/ano são transformados em vapor e 2.464 t/ano são considerados rejeito e descartado em aterro sanitário. Cabe ainda ressaltar que cerca de 90% dos resíduos gerados, ou seja, 365.222 t/ano são diretamente dispostas em aterro sanitário, ocasionando em uma redução no tempo de vida do aterro sanitário.

O cenário #2 enfatiza a coleta diferenciada e gerenciamento integrado de resíduos na cidade, das 410.047 t/ano de resíduos gerados, 350.855 t/ano são de resíduos domésticos e 59.191 t/ano de resíduos gerados pelo comércio. Neste cenário, 4.082 t/ano são diretamente enviados para a reciclagem, 61.182 t/ano de resíduos são destinados à triagem e, destes, 44.256 t/ano são reaproveitados, o restante resultante desta etapa, 16.926 t/ano, é incinerado. Ao tratamento biológico são enviados 81.983 t/ano de resíduos, sendo que 18.765 t/ano são destinados à incineração, o restante torna-se composto biológico e vapor, sendo suas quantidades de 31.668 t/ano e 31.550 t/ano, respectivamente. Além disso, são encaminhados diretamente à incineração, apenas, cerca de 3% de todo o resíduo gerado na cidade, sendo essa quantidade de 10.775 t/ano, as demais parcelas que são enviadas ao incinerador advém do produto de outros processos, causando a incineração total de 46.466 t/ano, na qual, 38.657 t/ano resultam em vapor da queima e 7.809 t/ano são rejeitos enviados para o aterro sanitário. Ainda, 252.024 t/ano são encaminhados diretamente ao aterro municipal sem sofrerem nenhum tipo de tratamento.

O cenário #3 coloca a incineração como uma das principais formas de tratamento no gerenciamento de resíduos do município em questão. Das 410.047 t/ano de resíduos gerados, 350.871 t/ano são de resíduos domésticos e 59.176 t/ano de resíduos gerados pelo comércio. Um total de 185.127 t/ano de resíduos é encaminhado diretamente à incineração, somando-se com os resíduos resultantes das etapas de triagem e tratamento biológico, este total chega a 212.997 t/ano de resíduos incinerados, no qual 1.918 t/ano pode ser reaproveitada como fonte de calor ou energia, 169.962 t/ano resultam em vapores de queima e 41.117 t/ano são rejeitos dispostos em aterro sanitário. Este cenário, ainda, destina 101.925 t/ano de resíduos à triagem, na qual 77.130 t/ano são reaproveitados e o restante é incinerado como dito anteriormente. Além disso, são encaminhados ao tratamento biológico 122.995 t/ano de resíduos, no qual 77.948 t/ano transformam-se em vapor, 39.874 t/ano tornam-se compostos biológicos, 2.099 t/ano são encaminhadas ao aterro sanitário e o restante é incinerado. Neste cenário todo o resíduo passa por algum tipo de tratamento prévio à destinação em aterro sanitário, mesmo assim, são destinados 43.216 t/ano de rejeitos aos aterros.

3.2. MODELO IWM-2 DE ICV EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O modelo *Integrated Waste Management* - IWM foi desenvolvido por White; Franke e Hindle (1995) e modificado por McDougall et al. (2001), sendo renomeado de IWM-2. Da aplicação deste modelo se obtém resultados como consumo de energia, taxas de emissões mássicas de descargas à atmosfera, à água e ao solo (rejeito a dispor em aterro sanitário), taxas de produção de materiais recicláveis, composto, entre outros (REICHERT, 2007).

3.3. METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS INDICADORES AMBIENTAIS DA AICV

Para a avaliação da sustentabilidade ambiental foram utilizados os seguintes critérios e indicadores, cujas fórmulas de cálculo são descritas por Den Boer et al. (2005) e apresentadas a seguir:

- Mudanças climáticas;
- Toxicidade humana;
- Formação de foto-oxidantes;
- Acidificação;
- Eutrofização;
- Uso energético.

3.3.1 Indicador: Mudanças climáticas – MdCI

Mudanças climáticas são causadas pela emissão na atmosfera de gases que afetam o chamado “efeito estufa”. Emissões típicas em sistemas de gerenciamento de RSU que contribuem ao aquecimento global incluem o CO₂, N₂O e CH₄. O Potencial de Aquecimento Global (PAG) é usado como fator de caracterização para avaliação e agregação da categoria mudanças climáticas. O indicador geral é calculado da seguinte maneira:

$$\text{MdCI} = \sum_{i=1}^n \text{PAG}_i \times m_i \quad \text{equação (1)}$$

onde:

- MdCI = resultado do indicador, que é expresso em kg CO₂ equivalente;
- PAG_i = Potencial de Aquecimento Global da substância i;
- m_i = massa da substância i emitida em kg.

3.3.2 Indicador: Toxicidade humana – ToHu

Esta categoria de impacto concerne os efeitos negativos à saúde humana de substâncias tóxicas emitidas ao ambiente nos meios ar (amônia, arsênico, Cd, CO₂, CO, Cr, Cu, óxido nitroso, dioxinas, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, ácido sulfídrico, Pb, Hg, CH₄, Ni, NO_x, SO₂ e Zn) e água doce (arsênico, Ba, Cd, DQO, Cr, Cu, dioxinas, fluoreto, Pb, Hg, Ni, nitrato, fenóis, fosfato e Zn). A forma de cálculo do indicador é a seguinte:

$$\text{ToHu} = \sum_{i=1}^n \sum_{\text{emeio}^k} \text{PTH}_{i,\text{emeio}} \times m_{i,\text{emeio}} \quad \text{equação (2)}$$

onde:

- ToHu = resultado do indicador, que é expresso em kg 1,4-diclorobenzeno equivalente;
- PTH_{i, emeio} = Potencial de Toxicidade Humana da substância i emitida para o meio emeio (ar ou água);
- m_i = massa da substância i emitida em kg.

3.3.3 Indicador: Formação de foto-oxidantes – FoFO

FoFO é a formação de compostos químicos reativos com o ozônio pela ação da luz solar sobre certos poluentes primários (CO, CH₄, NO_x e SO₂). Estes compostos reativos podem afetar negativamente a saúde humana e os ecossistemas bem como causar danos às plantas. O indicador é calculado com segue:

$$FoFO = \sum_{i=1}^n PCFOi \times mi \quad \text{equação (3)}$$

onde:

FoFO = resultado do indicador, que é expresso em kg etileno equivalente;

PCFOi = Potencial de Criação Fotoquímica de Ozônio da substância i;

mi = massa da substância i emitida em kg.

3.3.4 Indicador: Acidificação – Acid

Poluentes que causam acidificação do meio (amônia, NO_x e SO₂) têm uma variedade de impactos sobre o solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos vivos e sobre o ambiente construído. Apresenta-se abaixo a fórmula de cálculo deste indicador:

$$Acid = \sum_{i=1}^n PAi \times mi \quad \text{equação (4)}$$

onde:

Acid = resultado do indicador, que é expresso em kg SO₂ equivalente;

PAi = Potencial de Acidificação da substância i;

mi = massa da substância i emitida em kg.

3.3.5 Indicador: Eutrofização – Eutr

A eutrofização cobre os impactos potenciais da concentração excessiva de macronutrientes (amônia, NO_x, amônio íon, DQO, nitrato e fosfato), em especial o nitrogênio e o fósforo. Segue a equação de cálculo do indicador:

$$Eutr = \sum_{i=1}^n PEi \times mi \quad \text{equação (5)}$$

onde:

Eutr = resultado do indicador, que é expresso em kg PO₄ equivalente;

PEi = Potencial de Eutrofização da substância i;

mi = massa da substância i emitida em kg.

3.3.6 Indicador: Uso de energia – UsoEn

O indicador uso de energia representa o equivalente energético em GJ (giga Joule) líquido de todo o sistema de gerenciamento de RSU. Um valor positivo para *UsoEn* indica que há um consumo líquido de energia e um valor negativo que houve uma geração líquida de energia no cenário ou que a economia resultante da reciclagem dos materiais é maior que a energia consumida em todo o sistema. O indicador é calculado como segue:

$$UsoEn = \sum_{i=1}^n \frac{PCBi + qi}{efi} \quad \text{equação (6)}$$

onde:

UsoEn = resultado do indicador, que é expresso em GJ equivalente;

PCBi = Potencial Calorífico Bruto da fonte energética i;

qi = quantidade de energia ou combustível i utilizada, gerada ou poupada em kWh, L ou m³ (qi poupado ou gerado entra com sinal negativo na equação);

efi = eficiência energética da fonte i.

O programa IWM-2 calcula e dá como resultado de saída o indicador *UsoEn* (em GJ) para cada um dos cenários avaliados. O programa utiliza as fontes energéticas primárias com o respectivo poder calorífico bruto e eficiência de conversão em energia elétrica.

3.4 NORMALIZAÇÃO

Os fatores de normalização utilizados neste trabalho são os apresentados na Tabela 1. Desta forma, os indicadores ambientais foram normalizados em termos de equivalentes populacionais (EP) (habitantes), conforme metodologia sugerida por Guinée et al. (2002) em relação ao mundo no ano de 1995.

Tabela 1: Fatores de normalização, referência anual per capita.

CATEGORIA DE IMPACTO	MUNDO (PARA O ANO DE 1995)
Mudanças climáticas (kg CO ₂ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	6.830
Toxicidade humana (kg 1,4-diclorobenzeno eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	8.800
Formação de foto-oxidantes (kg C ₂ H ₄ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	8,04
Acidificação (kg SO ₂ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	52,9
Eutrofização (kg PO ₄ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	22,8
Uso de energia (GJ energia eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	72,0

Fonte: Adaptado de Guinée et al. (2002).

4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas Figuras 1 a 8 são apresentados os valores de quantificação do grau de impacto ambiental para cada indicador ambiental para os diferentes cenários. Ressalta-se que valores positivos indicam emissões de poluentes ao ambiente e negativos são considerados como impactos positivos, ou seja, benéficos para o meio ambiente, pois não emitem substâncias poluentes.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os resultados para o indicador *MdCl* e o indicador *FoFO*, respectivamente. Na Figura 1 observa-se que apesar de ocorrer destinação de resíduos para a triagem e para o tratamento biológico seu impacto neste indicador é praticamente inexistente em comparação ao tratamento térmico e a destinação a aterro sanitário. Estes representam praticamente todo o impacto negativo para os cenários #3, devido aos efluentes gasosos da incineração, e #1 devido aos gases gerados na decomposição dentro do aterro. O cenário #2 possui contribuições negativas tanto no tratamento térmico quanto na destinação final ao aterro. Ainda, nota-se que a reciclagem impactou o meio de forma positiva, na qual a maior contribuição foi do cenário #3. Ressalta-se que valores positivos indicam emissões de poluentes ao ambiente e negativos são considerados como impactos positivos, ou seja, benéficos para o meio ambiente, pois não emitem substâncias poluentes.

Na Figura 2 é possível ser observado que o cenário #1 seguido pelo #2 é o que mais forma substâncias que são foto-oxidadas devido aos gases provenientes da decomposição que ocorre no interior do aterro. No #3 percebe-se que a formação de substâncias que são foto-oxidadas é muito menor que nos outros cenários, isto se dá pelo tratamento dos gases provenientes da queima dos resíduos, o que libera efluentes gasosos com baixas concentrações dessas substâncias. Ainda percebe-se que o terceiro cenário, #3, é o que gera maior impacto positivo quanto à reciclagem.

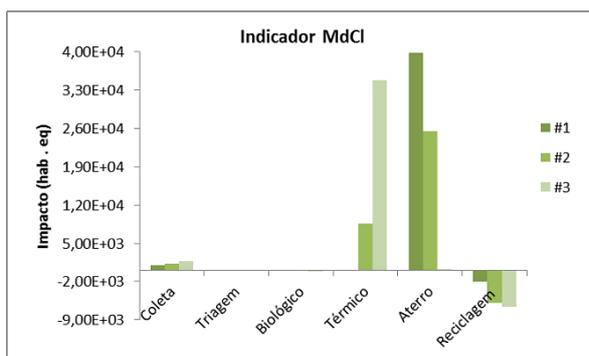


Figura 1 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *MdCl*

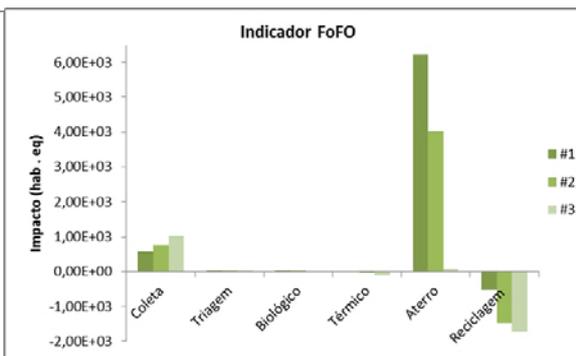


Figura 2 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *FoFO*

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados para os diferentes cenários em relação ao indicador *Acid* e o indicador *Eutr*, respectivamente. De acordo com a Figura 3, nota-se que todos os cenários contribuem para a emissão de poluentes que causam a acidificação nas etapas de coleta e disposição final (aterro sanitário), nos quais se destacam os cenários #3 e #1, respectivamente. Enquanto isso, na etapa da reciclagem, nota-se que todos os cenários geram benefícios ambientais, evitando emissões de poluentes que causam a acidificação.

Na Figura 4 pode ser observado que as etapas de coleta e disposição final são as que apresentam contribuição significativa ao impacto negativo, sendo o cenário #3 e #1, respectivamente, os que mais contribuem. Ainda, nota-se que a reciclagem apresenta uma expressiva contribuição de impactos positivos para os cenários #3 e #2.

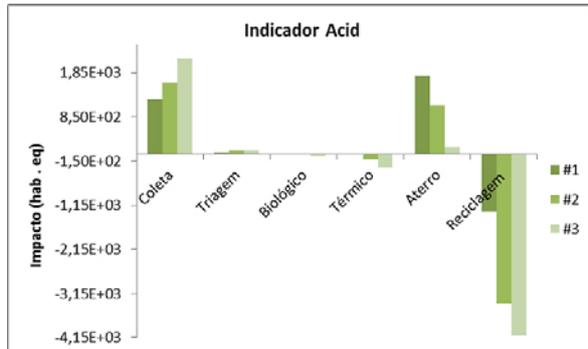


Figura 3 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *Acid*

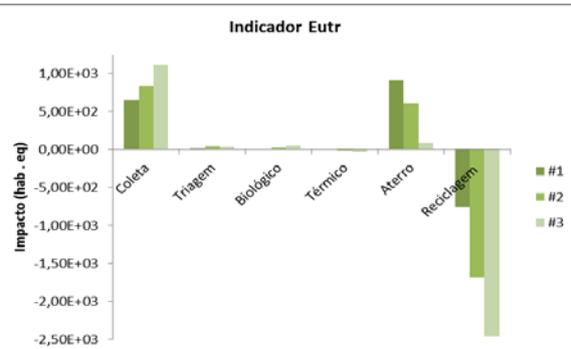


Figura 4 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *Eutr*

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados para os indicadores *ToHu* e *UsoEn*, respectivamente. De acordo com os valores apresentado na Figura 5, nota-se que todos os cenários contribuíram para a toxicidade humana, sendo o cenário #1 o de maior contribuição e o #3 de menor, na etapa de disposição final (aterro sanitário). No entanto, os demais impactos não ocorrem de forma representativa, quando se analisa a reciclagem, esta apresenta resultados muito satisfatórios em relação ao impacto positivo ou não geração de poluentes para toxicidade humana.

Como pode ser visto na Figura 6, todos os cenários apresentam um grande impacto negativo na etapa de coleta. Na destinação final observa-se que o cenário #1 é o que tem maior consumo dentre os outros e que o cenário #2 impacta positivamente, ou seja, deixa de consumir energia. Ainda percebe-se que tanto a etapa de tratamento térmico quanto de reciclagem há um grande impacto positivo, nos quais o cenário #3 se destaca fortemente.

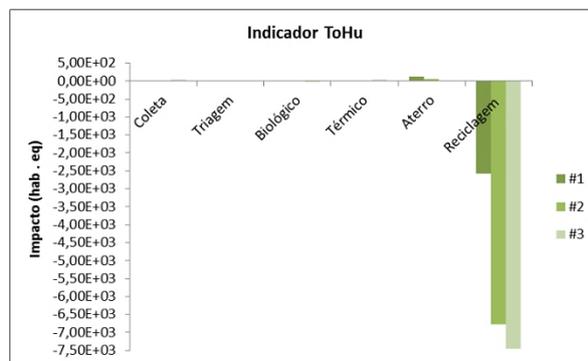


Figura 5 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *ToHu*

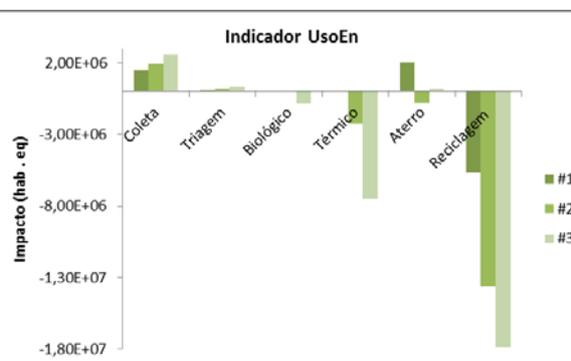


Figura 6 – Comparação de Impactos para os Cenários no Indicador *UsoEn*

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os resultados totais dos impactos para cada cenário. Na Figura 7 apresenta-se os totais para todos os totais para todos os indicadores, exceto o *UsoEn* que apresenta valores muito maiores que os outros e acabava mascarando os impactos dos outros indicadores. Na Figura 8 são apresentados os resultados somente para o indicador *UsoEn*.

É possível perceber a magnitude total do impacto dos 3 cenários, onde nota-se que o cenário #1 é o que apresenta maior impacto negativo para as mudanças climáticas devido a quase todos os resíduos serem dispostos diretamente em aterro sanitário sem prévio tratamento, o que contradiz a Lei Federal 12.305 de 2010 que obriga o tratamento prévio ao resíduo antes de sua disposição final ambientalmente adequada (aterro sanitário). Na Figura 7 é visível que o indicador *ToHu* possui um saldo positivo em relação aos outros indicadores.

Em relação aos impactos do indicador *Eutr*, os impactos da reciclagem apresentam benefícios ao ambiente tão significativos que no balanço final, apresentado na Figura 7, o *Eutr* fica com valores desprezíveis para os cenários, exceto para o cenário #1. É possível perceber, também, que o cenário #1 é o único que apresenta, no total de impactos, um resultado de impacto negativo para *Acid*, chegando a ser cerca de 110% maior que o apresentado pelo cenário #3. Ainda, são apresentados os impactos para o indicador *FoFO* que identifica-se, facilmente, que o cenário #1 é o que causa o maior impacto em relação aos outros.

Na Figura 8 é demonstrado que todos os cenários possuem um impacto positivo no balanço final para *UsoEn*, sendo o cenário #3 com o maior impacto positivo.

Desta forma, quando se compara as Figuras 7 e 8 percebe-se, facilmente, que o cenário #3 apresenta-se como o melhor cenário, ou seja, o que deixa de poluir ou produz um impacto positivo devido ao seu gerenciamento integrado ser eficiente. Fica ainda mais evidente o grau de impacto positivo que o cenário #3 gera ao meio ambiente se comparado ao cenário #1, apresentando aproximadamente 12 vezes mais benefícios ao meio ambiente do que o outro.

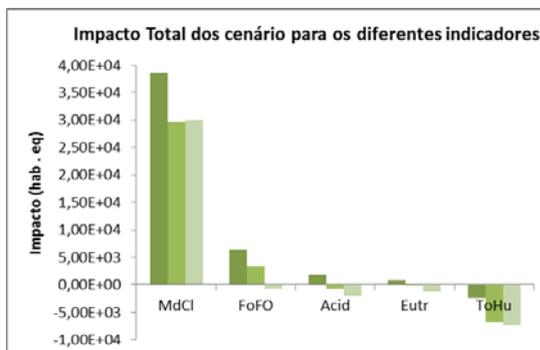


Figura 7 – Comparação dos Impactos totais para os diferentes indicadores e cenários, exceto o *UsoEn*

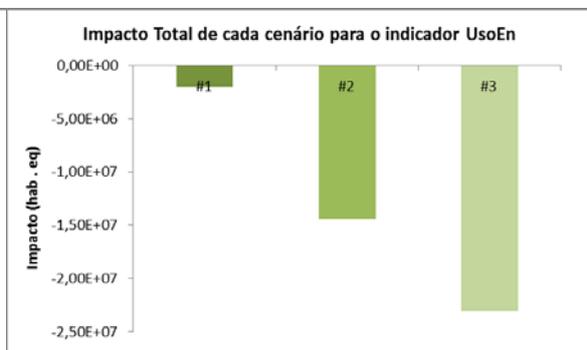


Figura 8 – Comparação do Impacto total de cada cenário para o indicador *UsoEn*

5 CONCLUSÕES

A busca por métodos e diferentes formas de aperfeiçoamento do processo de gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos deve ser feita de forma continuada. Assim, evita-se a disposição dos mesmos de forma imprópria, maximizando seus reaproveitamentos e minimizando desperdícios de recursos naturais e matérias-primas de fontes não renováveis.

Desta forma, a aplicação de sistemas de gerenciamento apropriados aos resíduos gerados em uma cidade é de extrema importância, pois estes podem causar doenças ao homem e o meio ambiente. Assim, a ACV é uma ferramenta de grande potencial para definição de modelos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos.

A aplicação da ACV permitiu verificar, nos três cenários utilizados, que entre as categorias de impacto ambiental, as que mais contribuíram para emissões de poluentes foram a coleta, a disposição em aterro e o tratamento térmico, em todos os indicadores ambientais, exceto o *UsoEn* em que a incineração apresenta-se como um impacto positivo nos cenários. A categoria de impacto que deixou de emitir poluentes e que causou um impacto positivo ao meio ambiente foi a reciclagem em todos os indicadores ambientais e cenários.

Ainda, verificou-se que o uso de energia foi maior na categoria da coleta, nos três cenários. Em contraste, as categorias de tratamento térmico e reciclagem apresentaram uma economia muito significativa em relação a este parâmetro. Além disso, o tratamento biológico e a triagem, não apresentaram impactos significativos, tanto negativos quanto positivos, para nenhuma das categorias e cenários analisados.

Por fim, conclui-se que o cenário #1, em que cerca de 90% dos resíduos são enviados diretamente ao aterro sanitário, uma realidade no Brasil que contraria a Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010) que visa o aterro sanitário como uma disposição final após esgotadas todas as outras possibilidades de tratamento, deve ser repensado de maneira a impactar menos o meio ambiente e a população. Nota-se que quaisquer cenários diferentes do #1 são mais benéficos ao ambiente e resultariam numa alternativa mais coerente em caso de melhoria de processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura*. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. vii, 22 f. ISBN 9788507015321.
2. BANAR, M., COKAYGIL, Z., OZKAN, A. *Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey*. *Waste Management*. v 29, 54-62, 2009.
3. BARTON, J.R., DALLEY, D., PATEL, V.S. *Life cycle assessment for waste management*. *Waste Management*. v 16, 35 - 50, 1996.
4. BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://pegasus.fmrp.usp.br/projeto/legislacao/12305_B3764-120810-SES-MT_D.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2016.
5. COLTRO, Leda. *Avaliação do Ciclo de Vida como instrumento de gestão*. Campinas, SP: CETEA/ITAL, 2007.
6. DE LUCCA, S.J. *PROGEST: Avaliação Técnico-Econômica e Social de Sistemas de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos Existentes no Brasil*. Porto Alegre, RS: Impressão e Reprodução Studio 57, 2000.
7. DEN BOER, E., DEN BOER, J., BERGER, J., JAGER, J. *Waste management planning and optimization: handbook of municipal waste prognosis and sustainability assessment of waste management systems*. Stuttgart: *Ibidem-Verlart*. 306 p. 2005.
8. GUINÉE, J.B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., KONING, A. de, OERS, L. van, WEGENER SLEESWIJK, A., SUH, S., UDO DE HAES, H.A., BRUIJN, H. DE, DUIN, R. VAN, HUIJBREGTS, M.A.J. *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers, 692 p. 2002.
9. HINZ, R.T.P., VALENTINA, L.V.D., FRANCO, A.C. *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.
10. MCDUGALL, F.R., WHITE, P.R., FRANKE, M., HINDLE, P. *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. 2. ed. Oxford: Blackwell Science Ltd. 513 p. 2001. Disponível em: <http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470999660_sample_379553.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2016.
11. MOL, M. *A sociedade de consumo e o descarte de resíduos*. *Ecodebate, cidadania e meio ambiente*. Revista Eletrônica. Abril de 2013. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2013/04/04/a-sociedade-de-consumo-e-o-descarte-de-residuos-artigo-de-marcos-mol/>>. Acesso em: 14 nov. 2016.
12. REICHERT, G.A. *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. 301 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre. 2013. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/87557>>. Acesso em: 13 dez. 2016.
13. REICHERT, G.A. *Potencial de utilização da ferramenta de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) na definição de modelos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos*. 2007. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
14. REICHERT, G.A., CASAGRANDE, V. *Aplicação do Modelo IWM-2 para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Porto Alegre/RS*. 2014. In: IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental.

15. REICHERT, G.A., MENDES, C.A.B. Avaliação do Ciclo de Vida e Apoio à Decisão em Gerenciamento Integrado e Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental - Vol. 19, n. 3 - pág. 301-313 - jul/set 2014.
16. SANTOS, G.G.D. Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros. 2011. 193 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
17. SCHNEIDER, V.E., RÊGO, R.C.E., CALDART, V., ORLANDIN, S.M. Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviço de Saúde. 1ª ed. São Paulo: Editora Balieiro, 2001.
18. SILVA, L.A., SOARES, F.R., SEO, E.S.M. Avaliação do ciclo de vida do processo biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia. InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade - vol. 10, no. 1, p 129 – Junho de 2015. Disponível em: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2015/06/132_InterfacEHS_ed-vol_10_n_1_2015.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2016.
19. US EPA – *United States Environmental Protection Agency. Life cycle assessment: principles and practice.* 2006. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1000L86.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006%20Thru%202010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C06THRU10%5CTXT%5C00000002%5CP1000L86.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&slide>>. Acesso em: 17 nov. 2016.
20. WHITE, P.R., FRANKE, M., HINDLE, P. *Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory.* 362 f. Springer US, 1995.
21. ZOCCHÉ, L. Identificação das Limitações da ACV sob a Ótica de Pesquisas Acadêmicas. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa, 2014.