



## Avaliação do ciclo de vida de resíduos sólidos urbanos: avaliação de dois cenários para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos na cidade de Porto Alegre/RS

Sofia Helena Zanella Carra<sup>1</sup>, Geraldo Antônio Reichert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Caxias do Sul (sofi\_carra@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade de Caxias do Sul (gareichert@cpovo.net)

### Resumo

O gerenciamento integrado de resíduos sólidos é um assunto em pauta nas cidades brasileira em virtude das exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Neste contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta de suporte à decisão para definição de modelos de produção e gerenciamento mais sustentáveis. O modelo computacional IWM-2 permite prever os impactos ambientais e custos econômicos de um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, considerando as seguintes etapas: coleta de resíduos, triagem, tratamento biológico, tratamento térmico, aterro sanitário e reciclagem. O presente trabalho objetiva a comparação entre dois modelos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos para a cidade de Porto Alegre/RS (cenário atual e cenário teste) utilizando a ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV), através do software IWM-2, para avaliar qual cenário gera o menor impacto ambiental. Para a AICV foram considerados oito indicadores onde se observou que o cenário teste gera o menor impacto ambiental em função de haver maior reciclagem e menor disposição de resíduos em aterro sanitário. A ferramenta de ACV deverá ser utilizada futuramente pelos órgãos públicos para auxiliar no processo de tomada de decisão, visando atender as exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos de maneira ambientalmente efetiva, economicamente viável e socialmente aceitável.

Palavras-chave: ACV, resíduos sólidos urbanos, gerenciamento integrado de resíduos sólidos.

Área Temática: Resíduos sólidos

### Abstract

The integrated management of solid waste is a subject matter in Brazilian cities under the requirements of the National Solid Waste. In this context, the life cycle assessment ( LCA ) arises as a decision support tool for defining models of production and management more sustainable . The IWM - 2 computer model can predict the environmental and economic costs of a system of solid waste management, taking the following steps: waste collection, sorting, biological treatment, thermal treatment, landfill and recycling. The present study aims to compare two models of integrated management of municipal solid waste to the city of Porto Alegre/RS (current scenario and scenario testing) using the analysis tool of life cycle assessment (LCA), through software IWM-2 to assess which scenario produces the least environmental impact. For LCIA were considered eight indicators where it was observed that the test scenario generates less environmental impact due to be greater recyclability and lower waste disposal in landfill. The LCA tool tends to be used more frequently by the government, to meet the requirements of the National Solid Waste in an environmentally effective, economically viable and socially acceptable.



*Key words: LCA, municipal solid waste, integrated management of solid waste.*

*Theme Area:*

## 1 Introdução

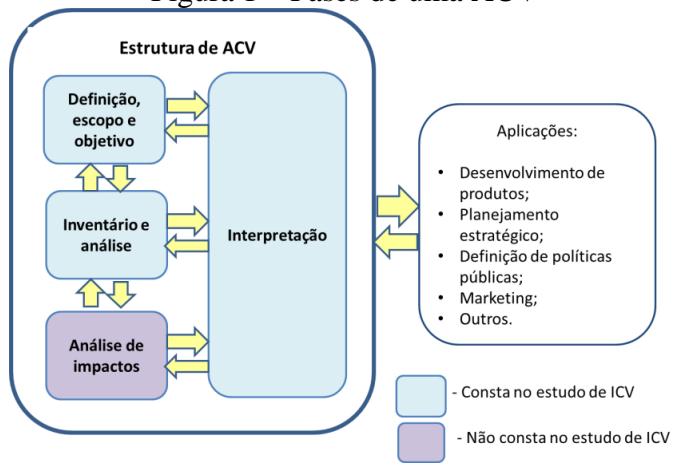
De acordo com a Lei 12.305/10 (BRASIL, 2010), a gestão integrada de resíduos sólidos é um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável. De acordo com Reichert (2007), a hierarquia do gerenciamento integrado estabelece a seguinte ordem de prioridade: redução na origem; reaproveitamento e reciclagem; tratamento; e disposição final.

Em cada região há peculiaridades, como aspectos culturais, econômicos, ambientais, entre outros, que não permitem definir um modelo ideal de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Desta forma, cada município deve definir qual é o modelo de gerenciamento integrado mais eficiente e sustentável para ser implantado na sua localidade levando em consideração a realidade do local. Neste contexto, a análise do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta de suporte à decisão para definição de modelos de produção e gerenciamento mais sustentáveis.

De acordo com a Norma NBR ISO 14040 (ABNT, 1997), a análise do ciclo de vida (ACV) é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. É uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto mediante a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto, avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas bem como a interpretação dos resultados das fases de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos.

O processo ACV é uma sistemática abordagem faseada composta por quatro componentes: definição de objetivos e âmbito; análise de inventário; análise de impacto; e interpretação dos resultados, como ilustrado na Figura 1 (NBR ISO 14040: 1997).

Figura 1 – Fases de uma ACV



A primeira componente da ACV consiste na definição dos objetivos do estudo, seu âmbito, estabelecimento da unidade funcional, e estabelecimento de um procedimento para assegurar a qualidade do estudo (Consoli *et al. apud* Ferreira, 2003). A fase seguinte da metodologia ACV é a análise do inventário de ciclo de vida (ICV), que identifica e quantifica as entradas e saídas de e para o ambiente, do sistema de produto investigado. A terceira



## 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

componente da ACV é a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), definida como sendo um processo técnico, quantitativo, e/ou qualitativo, para caracterizar e avaliar os efeitos das cargas ambientais identificadas no inventário (SETAC, Consoli *et al.*, *apud* Ferreira, 2003).

Todos os subsistemas (geração, coleta, reciclagem, tratamento e aterro sanitário) do modelo de gerenciamento integrado devem ter suas entradas e saídas calculadas. Esta é uma das principais dificuldades de aplicação da ferramenta de ICV, principalmente em países em desenvolvimento, onde uma das lacunas mais importantes é a falta de informações sobre todos estes processos (Sanchez *et al.*, 2000 *apud* Reichert, 2007).

McDougall *et al.* (2001) fazem a conexão entre Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – GIRS – e Análise de Ciclo de Vida – ACV. O modelo desenvolvido por McDougall *et al.* (2001) é chamado de IWM-2, cujo objetivo deste modelo é ser capaz de ser o mais preciso possível para prever os impactos ambientais e custos econômicos de um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos. O programa permite o desenvolvimento de novos cenários, a modificação de cenários existentes bem como a comparação entre cenários distintos.

Neste modelo computacional as informações são inseridas na seguinte ordem: entrada de resíduos, coleta de resíduos, triagem, tratamento biológico, tratamento térmico, aterro sanitário e reciclagem. Após a inserção das informações no modelo, o IWM-2 realiza o ICV, contemplando os custos, uso de energia, emissões atmosféricas, contaminação da água e resíduo sólido final. De posse das informações do ICV inicia-se a terceira fase da análise de ciclo de vida, chamada AICV, onde definem-se os indicadores de impacto a serem analisados e então estes são classificados, caracterizados e normalizados, o que permite comparar os indicadores e avaliar o impacto ambiental do sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos.

## 2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo comparar dois modelos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos para a cidade de Porto Alegre/RS utilizando a ferramenta de avaliação do ciclo de vida (ACV), através do programa computacional IWM-2, para avaliar qual cenário gera o menor impacto ambiental.

## 3 Metodologia

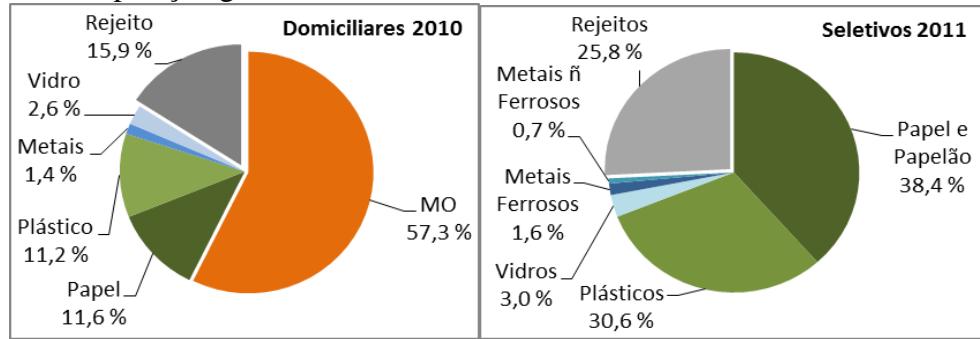
De acordo com o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) da cidade de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, no ano de 2011, a população atendida pela coleta de resíduos sólidos era de 1.413.094 habitantes, totalizando 523.368 domicílios atendidos. A geração *per capita* de resíduos domiciliares (orgânico e inorgânico) é de 248,3 kg/hab.ano, o que corresponde a 0,79 kg/hab.dia, e a geração de resíduos comerciais no ano de 2011 foi de 59.176 t/ano. A composição gravimétrica dos resíduos de Porto Alegre, referente ao ano de 2011, podem ser observados na Figura 2.



## 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

Figura 2 – Composição gravimétrica resíduos da coleta convencional domiciliar e seletivo



Fonte: DMLU (2011)

Para realizar a avaliação do ciclo de vida dos resíduos sólidos urbanos de Porto Alegre/RS foi utilizado o modelo computacional IWM-2. Dois cenários contendo diferentes sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos foram modelados e comparados: o cenário base (sistema de gerenciamento atual) e um cenário teste, contendo a definição de um situação futura a ser avaliada.

O cenário base (atual) contempla as seguintes etapas: coleta, triagem, compostagem e disposição final em aterro sanitário. Neste cenário, os resíduos coletados porta-a-porta e os resíduos comerciais foram inseridos como entradas. O cenário considerou três saídas para o total de resíduos coletados: os recicláveis são encaminhados para a central de triagem, onde são segregados e o rejeito é disposto em aterro sanitário; os resíduos orgânicos têm duas saídas: o tratamento biológico (compostagem) ou disposição final diretamente em aterro sanitário.

O segundo cenário (cenário teste) contempla as seguintes etapas: coleta, triagem, incineração e disposição dos rejeitos em aterro sanitário. Neste cenário os resíduos coletados porta-a-porta, os resíduos entreguem de forma voluntária em PEV's (pontos de entrega voluntários) e os resíduos comerciais foram inseridos como entradas. Foram consideradas as seguintes saídas: os resíduos entregues em PEV's são diretamente reciclados, os resíduos recicláveis são encaminhados para a central de triagem, segregados e o rejeito é encaminhado para incineração e o restante dos resíduos coletados são incinerados. O rejeito da incineração é disposto em aterro sanitário. Ressalta-se que, na etapa de incineração, uma parte de resíduos é recuperada, como os metais, e parte é volatilizada.

De posse das informações contempladas pelo ICV iniciou-se a terceira fase da análise do ciclo de vida, chamada AICV, onde definiram-se seis indicadores para avaliação da sustentabilidade ambiental dos cenários avaliados: mudanças climáticas, toxicidade humana, formação de foto-oxidantes, acidificação, eutrofização e uso de energia. Na segunda etapa da AICV, chamada classificação, avaliaram-se os parâmetros atribuídos a cada indicador ambiental. Ressalta-se que os parâmetros podem influenciar em mais de um indicador. Neste trabalho consideraram-se os parâmetros sugeridos por Reichert (2007) adaptado de Den Boer *et al.* (2005), para cada indicador ambiental.

Na caracterização, terceira etapa da AICV, realizaram-se os cálculos para avaliar a significância relativa de cada fator contribuinte ao impacto global do sistema em estudo, convertendo-os em um indicador comum, utilizando metodologia proposta por Den Boer *et al.* (2005) adaptado de Reichert (2007).

A quarta etapa da AICV é a normalização, utilizada para expressar o indicador de impacto de maneira que possa ser comparado dentre as categorias de impacto. Desta forma os indicadores ambientais foram normalizados em termos de equivalentes populacionais – EP – (habitantes), conforme metodologia sugerida por Guinée *et al.* (2005) *apud* Reichert (2013);



## 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

sendo os resultados apresentados em percentagem (%) da população de Porto Alegre para os indicadores calculados neste trabalho.

A partir dos valores normalizados, foram elaborados gráficos para comparação, em cada etapa e no contexto geral, de qual cenário contempla o gerenciamento integrado de resíduos sólidos com o menor impacto ambiental.

## 4 Resultados

Na Tabela 1 apresenta-se os resultados da AICV, cujos valores foram normalizados em termos de equivalentes populacionais (EP), sendo os resultados apresentados em porcentagem (%) da população de Porto Alegre para os indicadores calculados.

Tabela 1 – Resultados AICV

Parâmetro	Cenário	Coleta	Triagem	Compostagem	Incineração	Aterro sanitário	Reciclagem	Total
Mudanças climáticas	Cenário base	956,11	30,75	3,90	-	39745,21	-2026,50	38709,47
	Cenário teste	1250,90	119,55	-	45057,44	138,68	-7035,93	39530,64
Toxicidade humana	Cenário base	16,46	0,72	0,32	-	101,44	-2583,33	-2464,39
	Cenário teste	20,17	3,36	-	38,12	2,39	-7011,92	-6947,88
Formação de Foto-oxidantes	Cenário base	578,07	17,16	0,70	-	6230,39	-528,84	6297,47
	Cenário teste	765,58	63,03	-	-74,06	83,63	-1899,75	-1061,56
Acidificação	Cenário base	1261,37	37,75	1,86	-	1779,78	-1293,98	1786,77
	Cenário teste	1623,35	139,64	-	-386,23	182,52	414,80	1974,08
Eutrofização	Cenário base	652,12	19,02	3,77	-	936,52	-758,99	852,43
	Cenário teste	836,44	68,90	-	-36,16	94,30	-1392,06	-428,59
Uso de energia	Cenário base	1470,01	73,86	36,22	-	2047,31	-5667,11	-2039,71
	Cenário teste	1930,06	355,431	-	-9520	217,278	-18441,667	-25458,9

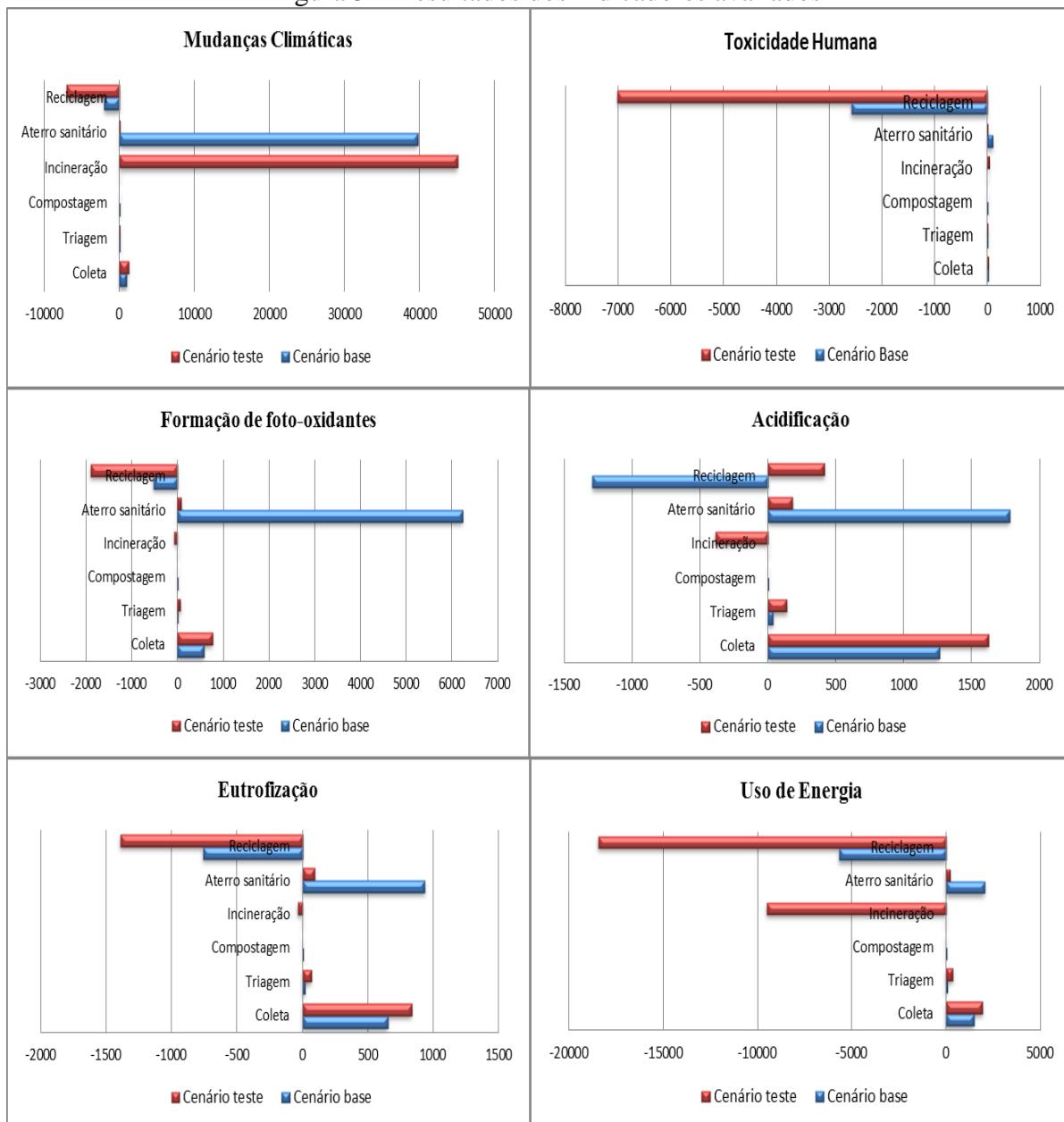
As figuras com a comparação dos resultados para cada cenário, em relação à cada indicador, são apresentados abaixo. Na Figura 3 apresentam-se os resultados para os indicadores: mudanças climáticas, toxicidade humana, formação e foto-oxidantes, acidificação, eutrofização e uso de energia.



## 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

Figura 3 – Resultados dos indicadores avaliados



Conforme observado nos gráficos apresentados na Figura 3, no cenário base, a disposição final dos resíduos em aterro sanitário é a etapa que apresenta maior impacto ambiental em todos os indicadores analisados. Para o cenário teste, os indicadores de mudanças climáticas e toxicidade humana a incineração é a etapa que provoca o maior impacto ambiental ao passo que para os indicadores de formação de foto-oxidantes, acidificação, eutrofização e uso de energia a etapa de coleta apresenta-se como a etapa mais impactante.

A reciclagem, em ambos os cenários, apresenta valores negativos em praticamente todos os indicadores analisados. Isso porque, através da reciclagem, há uma redução na emissão de gases que contribuem com as mudanças climáticas e que são tóxicos ao ambiente, redução na emissão de poluentes primários, redução na concentração excessiva de macronutrientes, que desencadeiam a eutrofização, redução no consumo de energia para a fabricação de novos produtos, entre outros benefícios ambientais.

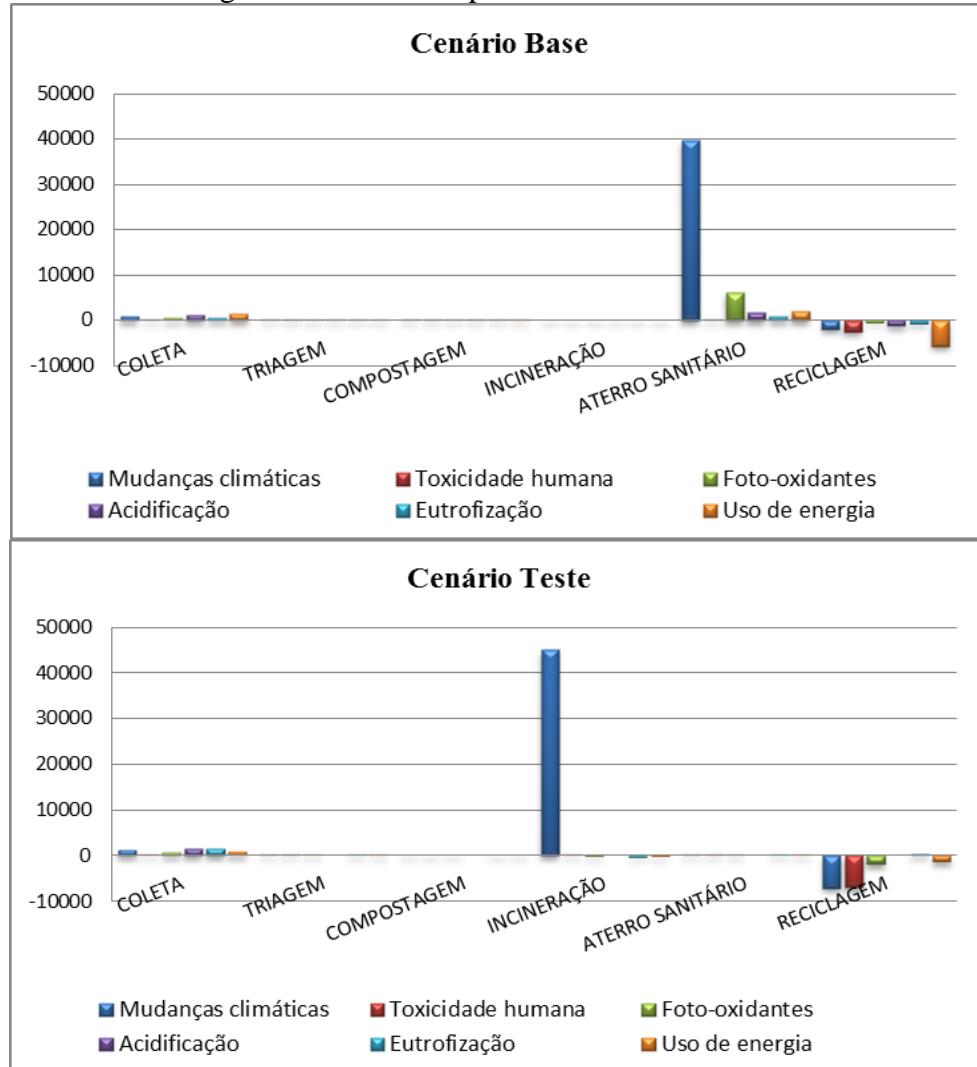
Na Figura 4 apresenta-se o resultado dos indicadores para os cenários avaliados.



#### 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

Figura 4 – Resultado para os cenários avaliados



Conforme observado na Figura 4 observa-se que, no cenário base, o maior impacto ambiental refere-se à destinação final em aterro sanitário em virtude da emissão considerável de gases que provocam as mudanças climáticas. A etapa de reciclagem é positiva em todos os indicadores, do ponto de vista ambiental, em virtude dos benefícios já citados, sendo que o indicador de uso de energia é o mais significativo, em função da economia de energia para produção de novos produtos. No cenário teste, observa-se que o maior impacto ambiental refere-se a etapa de incineração para o indicador de mudanças climáticas e a etapa da reciclagem apresenta-se como positiva para praticamente todos os indicadores avaliados, da mesma forma que para o cenário base..

## 5 Considerações finais

O modelo IWM-2 apresenta-se como uma ferramenta essencial para a gestão ambiental no que tange ao gerenciamento integrado de resíduos sólidos, visto que auxilia na tomada de decisão em busca de um sistema com redução no impacto ao meio ambiente. O modelo é de fácil interação, todavia, exige uma grande quantidade de informações, o que pode ser enfrentada com dificuldade para utilização em alguns municípios, visto que a maioria não dispõe de todas estas informações.



## 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014

Em relação à comparação entre os cenários base e teste, proposto neste trabalho, observou-se que o cenário teste é o que provoca o menor impacto ambiental. Isso se deve a maior reciclagem e menor disposição de resíduos em aterro sanitário. Todavia, a ACV não deve ser utilizada isoladamente para decidir qual sistema de gerenciamento de resíduos é o mais adequado, visto que os aspectos sociais não são avaliados bem como a totalidade dos custos do sistema. Ressalta-se que a participação social pode ser realizada através da discussão dos cenários junto à população e é imprescindível que os custos reais sejam contabilizados. A ferramenta de ACV deverá ser utilizada futuramente pelos órgãos públicos para auxiliar no processo de tomada de decisão, visando atender as exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos de maneira ambientalmente efetiva, economicamente viável e socialmente aceitável.

## 6 Referências bibliográficas

- BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Disponível em: <<http://www.abesdn.org.br/legislacao/lei-12305.pdf>>. Acesso em: 01 de ago. 2013.
- DAVISON, S.; Bennett, P. and McDougall, F.R. 2000. Local Authority Decision Making: Life Cycle Inventory Tools for Solid Waste Management.
- DMLU. Informações coleta de resíduos em Porto Alegre: 2011.
- FERREIRA, J. V. R. Análise de Ciclo de Vida dos Produtos. Instituto Politécnico de Viseu: 2004.
- ISO 14040. 1997. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneve, ISO, 1997.
- MCDougall, F.R.; WHITE, P.R.; FRANKE, M. AND HINDLE, P. 2001. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. 2nd Edition. Pub. Blacwell Science Ltd., Osney Mead, Oxford, England, OX2 0EL.
- REICHERT, G.A. 2007. *Potencial de utilização da ferramenta de inventário de ciclo de vida (ICV) na definição de modelos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos*. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABES, 2007.
- REICHERT, G. A. Metodologia de cálculo dos indicadores ambientais da AICV: 2013.
- WHITE, P.R.; Franke M. and Handle P. 1995. Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory. Aspen Publishers, Inc. 200 Orchard Ridge Drive, Gaithersburg, MD 20878.