

**O USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DA  
RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**USE OF SYSTEM DYNAMICS TO EVALUATE SCENARIOS OF SOLID WASTE  
RECYCLING**

Eugênio de Oliveira Simonetto<sup>1</sup>, Glauco Oliveira Rodrigues<sup>2</sup>, Luiz Cláudio Dalmolin<sup>3</sup>, Nilson Ribeiro Modro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Administração- PPGA  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria/RS – Brasil  
[eosimonetto@gmail.com](mailto:eosimonetto@gmail.com)

<sup>2</sup>Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - CTISM  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria/RS – Brasil  
[glaucop10@redes.ufsm.br](mailto:glaucop10@redes.ufsm.br)

<sup>3,4</sup>Departamento de Sistemas de Informação  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC – São Bento do Sul/SC – Brasil  
[lcdalmolin@gmail.com](mailto:lcdalmolin@gmail.com) , [nilsonmodro@gmail.com](mailto:nilsonmodro@gmail.com)

**Resumo**

*Neste artigo apresenta-se um modelo de simulação computacional, desde seu desenvolvimento até sua validação, que tem por objetivo auxiliar gestores ambientais em suas decisões com relação à definição e/ou manutenção de políticas de reciclagem de resíduos sólidos, bem como avaliar os benefícios do processo no meio ambiente (nesse artigo foi avaliada a economia de energia elétrica). Para a construção do modelo considerou-se: a taxa de crescimento natural populacional (nascimentos e mortes), percentual de resíduo sólido reciclado (para cada tipo de material), composição gravimétrica do material no total de resíduo gerado, quantidade de resíduos gerada por habitante e a economia de energia elétrica ocasionada por cada tipo distinto de material. Através dos resultados gerados pelo modelo, os usuários finais (gestores ambientais) do mesmo poderão, por exemplo, definir incentivos à redução da geração total de resíduos sólidos, produzir campanhas valorizando o reuso e a reciclagem e avaliar os benefícios relativos à economia de energia elétrica ocasionados pela reciclagem. A validação do modelo foi através da análise de cenários futuros para um determinado município da região sul do Brasil.*

**Palavras-Chave:** Simulação Computacional, Reciclagem de Resíduos, Gestão Ambiental.

**Abstract**

*In this article is presented a computer simulation model, since their development until its validation, which aims to support environmental managers in their decisions regarding the definition and / or maintenance of solid waste policies recycling, as well as evaluating the benefits of process in the environment (in this article we evaluated the energy savings). For the model development was considered: the rate of natural population growth (births and deaths), percentage of solid waste recycled (for each type of material), gravimetric composition of the material in the*

*total waste generated, the amount of waste generated per inhabitant and energy savings caused by each distinct type of material. Through the model results generated, end users (environmental managers) thereof may, for example, set incentives to reduce the total generation of solid waste, produce campaigns enhancing reuse and recycling and to assess the relative benefits of energy savings caused by recycling. Model validation was through analysis of future scenarios for a given municipality in southern Brazil.*

**Key-words:** *Computer simulation, Recycling, Environmental Management.*

## **1. Introdução**

A reciclagem de resíduos é uma excelente alternativa para a busca do desenvolvimento sustentável na gestão integrada dos resíduos sólidos, pois permite a economia de energia elétrica, bem como um menor uso de recursos naturais na produção de aço, alumínio, papel / papelão, plástico e vidro. Outro aspecto que denota a importância da reciclagem de resíduos é o fato de ser considerada uma ação prioritária pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (MINISTÉRIO..., 2011).

O estudo da gestão integrada de resíduos sólidos tem atraído a atenção de pesquisadores da área de sistemas de apoio a decisão nos últimos anos, pois através do uso das ferramentas dessa área pode-se representar uma situação do mundo real, estudar seu comportamento e tomar decisões com base nas conclusões extraídas (BANI et al., 2009). Prova disso, são os inúmeros trabalhos publicados na área, os quais vão desde a alocação de veículos para a coleta dos resíduos (EVERETT ; SHAHI, 1997) até a construção de modelos de avaliação de impacto ambiental provocado pela disposição final dos resíduos, levando em consideração o tipo de disposição, o tipo de resíduo e a área onde o mesmo foi depositado (PERRODIN et al., 2002). Outros autores (HUANG; BAETZ; PATRY, 1998; CHANG;WEI, 2000; COSTI et al, 2004; SUFIAN; BALA, 2007; TANSKANEN, 2000; TUNG; PINNOI, 2000) já utilizaram técnicas e métodos de sistemas de apoio a decisão para desenvolver estudos nesta área específica, embora bastante escassos no Brasil.

O objetivo do artigo é apresentar a modelagem, desenvolvimento e validação de um modelo de simulação computacional, que permite aos decisores da área ambiental, mais especificamente da área de resíduos sólidos avaliarem e analisarem cenários acerca da reciclagem de resíduos de sólidos, tanto no que tange à quantidade de resíduos reciclados, como nos benefícios gerados pela mesma, no caso do artigo, foi avaliada a economia de energia elétrica obtida com o processo de reciclagem dos diferentes tipos de materiais reciclados. Para exemplificar a economia de energia elétrica ocasionada pela reciclagem pode-se citar o caso do alumínio (HISATUGO; MARÇAL JR., 2007), onde para produção de 1 tonelada a partir da matéria prima utiliza-se 17,6 Mwh e, para a

produção da mesma quantidade, a partir do alumínio reciclado, utiliza-se apenas 0,75 Mwh gerando, assim, uma economia de 16,85 Mwh (95% de economia de energia elétrica).

Para tal, o problema de pesquisa consistiu da investigação, definição e validação das variáveis componentes do modelo de simulação, bem como da concepção e validação do mesmo. Para o desenvolvimento do modelo computacional foram utilizadas técnicas oriundas da área de *system dynamics* (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005; GHARAJEDAGHI, 2006). O uso de ferramentas da área de sistemas de apoio a decisão busca agregar qualidade ao processo decisório, pois, ainda hoje, muitas decisões sobre a gestão dos resíduos sólidos embasadas, somente, na experiência dos gestores (CHANG;WEI, 2000).

## **2. Método da Pesquisa**

Neste trabalho a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseada na metodologia proposta por Law e Kelton (1991) e, consistiu das seguintes etapas: (1) estudos exploratórios em artigos científicos, manuais de referência e entrevistas com gestores da área de resíduos sólidos, na qual o problema foi caracterizado e estruturado, bem como foi formulada a hipótese dinâmica, a qual é apresentada na seção 2.1; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando-se o simulador Vensim (VENSIM, 2012) da área de *system dynamics*; (4) validação da solução, através de testes em laboratório e em campo, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada, bem como através da simulação de um experimento utilizando três cenários para tal.

Os cenários que foram utilizados para a validação do modelo foram gerados a partir de análises, onde foram utilizados dados históricos relativos aos censos populacionais de 2000 e 2010 (IBGE, 2010), o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2010 (ABRELPE, 2011), o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (MINISTÉRIO..., 2011), bem como do Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos (MINISTÉRIO..., 2010) e, também, através da participação de pesquisadores e especialistas na área. A formulação da hipótese dinâmica, bem como os conceitos envolvidos no desenvolvimento da pesquisa (dinâmica de sistemas e reciclagem de resíduos) são apresentados a seguir nas seções 2.1, 2.2 e 2.3.

### **2.1 Formulação de Hipótese Dinâmica**

Segundo Silva (2006), a hipótese dinâmica visa trabalhar a teoria do problema, analisando o seu comportamento e observando quais as variáveis fazem parte do sistema. Neste artigo,

incorporaram-se 4 (quatro) variáveis básicas: variação populacional, geração de resíduos, economia de energia elétrica e os tipos de materiais que podem ser reciclados (alumínio, aço, papel / papelão, vidro e plástico). O objetivo dessa etapa é formular uma hipótese que explique a dinâmica como consequência da estrutura interna do sistema por meio da interação entre as variáveis e os agentes representados no modelo, incluindo regras de decisão (STRAUS, 2010). Assim, a hipótese dinâmica do modelo de *systems dynamics* deste trabalho é definida a seguir, como sendo:

- A variação populacional associada à quantidade de resíduos gerada pelos elementos componentes da população possui influência direta na quantidade total de resíduos sólidos urbanos gerada e reciclada, por sua vez, influenciando na economia de energia elétrica decorrente da reciclagem de alumínio, aço, papel / papelão, vidro e plástico.

## **2.2 Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*)**

A metodologia *system dynamics* (SD) permite o estudo do comportamento dos sistemas ao longo do tempo, de maneira a permitir a avaliação das consequências de nossas decisões (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005). Por tal motivo e a necessidade de estudar a reciclagem dos resíduos em um horizonte temporal futuro decidiu-se utilizá-la na modelagem e simulação computacional. Um modelo de SD pode ser interpretado como a estrutura resultante da interação de políticas. Esta estrutura é formada por dois componentes principais, que são os estoques e os fluxos, tanto que Ford (2009) define os SD como uma combinação de estoques e fluxos que utilizam uma estrutura computacional para serem simulados. Sufian e Bala (2007) utilizaram essa abordagem para a modelagem do sistema de gestão de resíduos sólidos da cidade de Dhaka-Bangladesh. Outros autores que também utilizaram tal metodologia foram Abeliotis et al., 2009; Dyson e Chang, 2005; Kum; Sharp e Harnpornchai, 2005.

## **2.3 Reciclagem de Resíduos**

Reciclagem, segundo O’Leary (1999), é o processo pelo qual, resíduos que são destinados à disposição final são coletados, processados e reutilizados. Monteiro (2001) define reciclagem como sendo a separação de materiais do lixo domiciliar, tais como papéis, plásticos, vidros e materiais, com a finalidade de trazê-los de volta à indústria para serem beneficiados. Estes materiais são novamente transformados em produtos comercializáveis.

Apesar de ser uma boa alternativa para a redução de resíduos destinados aos aterros, apenas uma pequena parcela (aproximadamente 10%) dos resíduos são reutilizados ou reciclados nas cidades gaúchas, segundo a CEMPRE (Organização Não-Governamental Compromisso

Empresarial para Reciclagem) (NETTO, 2001). Um dos motivos para tal parcela reduzida de reciclagem deve-se ao mau acondicionamento dos resíduos pela população, fato este gerado pela falta de informação acerca da coleta seletiva.

Outros fatores que contribuem para o pequeno índice de reciclagem dos resíduos é o alto custo da coleta seletiva para as municipalidades (O'LEARY et al., 1999; MONTEIRO et al., 2001), assim como a falta de um sistema corretamente dimensionado em termos da capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem. Mas apesar dos problemas enfrentados, os municípios estão investindo e apoiando cada vez mais a reciclagem de resíduos, seja através da coleta seletiva ou pela construção de usinas de reciclagem, devido ao fato do excessivo tempo de decomposição dos resíduos e na busca contínua de um melhor aproveitamento destes (CHANG; WEI, 2000).

### **3. Modelo de Simulação e Variáveis Componentes**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (MINISTÉRIO..., 2011) definiu a ordem de ações a ser seguida na gestão de resíduos, onde, dentre as quais, foi incluída a reciclagem como uma das principais ações. Associado à prioridade atribuída pela PNRS, verifica-se a crescente geração de resíduos sólidos pela população (ABRELPE, 2012), logo, demandando que alternativas viáveis ao melhor aproveitamento dos resíduos sólidos sejam criadas e executadas. Nesse aspecto, a reciclagem dos resíduos surge como uma alternativa viável, já que no momento em que o material é reciclado ele não demanda espaço em um aterro sanitário, não polui o meio ambiente e não utiliza recursos naturais em excesso na sua transformação.

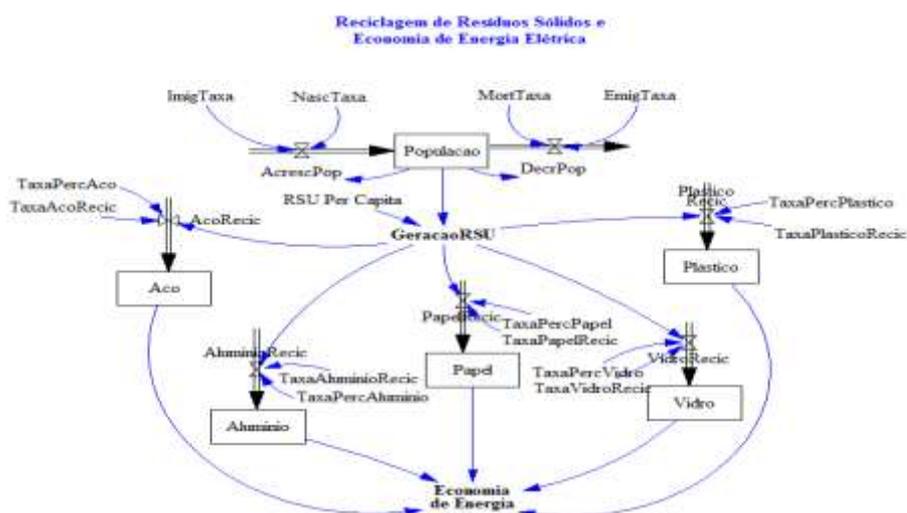
Tendo por embasamento a prioridade atribuída à reciclagem pela PNRS e os ganhos ambientais ocasionados por essa, nesse trabalho buscou-se o desenvolvimento de um modelo de simulação o qual permitisse tanto aos gestores ambientais, quanto os da área de resíduos sólidos avaliar políticas de reciclagem de resíduos no que refere-se aos materiais reciclados e aos ganhos ambientais, visando o desenvolvimento sustentável, gerados por esta. No modelo desenvolvido os materiais reciclados considerados foram o alumínio, aço, papel / papelão, vidro e plástico. Quanto à questão referente aos ganhos ambientais, no modelo, foi avaliada a economia de energia elétrica gerada pela reciclagem de tais materiais. Outros recursos poderiam ser avaliados, tais como: redução do corte de árvores, redução do consumo de água, minimização do uso de petróleo, etc.

As decisões, a partir das análises geradas pelo modelo, poderão envolver a busca pela elevação da taxa de reciclagem (com campanhas de conscientização da população), busca pela redução do consumo, incentivos ao aumento do “consumo verde” (reduzindo resíduos orgânicos no meio ambiente) (MANSVELT, 2010), bem como outras análises e observações de interesse dos

gestores ambientais e/ou municipais, desde que as mesmas sejam exequíveis no modelo de simulação. O modelo foi implementado buscando simplificar a interação usuário-computador, para que análises do tipo “o que se?” (*what-if?*), comuns em modelos de simulação, sejam de rápida e simples execução.

Para a definição das variáveis do modelo de simulação (Figura 1) foram utilizados trabalhos acadêmicos e governamentais da área de resíduos sólidos (ABRELPE, 2012; IBGE, 2010; KUM et al., 2005; MINISTÉRIO..., 2010; MINISTÉRIO, 2011; MONTEIRO et al., 2001; UNEP, 2005). A validação dessas foi executada com a participação de gestores ambientais e profissionais da área de resíduos sólidos. As variáveis selecionadas, bem como suas inter-relações com outras variáveis, as quais influenciam nos valores totais de geração e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, são:

Figura 1 – Modelo de simulação desenvolvido



Fonte: elaborado pelos autores.

- A taxa de nascimento anual (*NascTaxa*), a taxa de mortalidade anual (*MortTaxa*), a taxa de imigração anual (*ImigTaxa*) e a taxa de emigração anual (*EmigTaxa*), todas estas influenciando diretamente os fluxos de entrada e saída populacional (*AcrescPop* e *DecrPop*), os quais determinam a população total (*Populacao*) do município. Foi utilizada no modelo a taxa de crescimento natural ou vegetativo (total de nascimentos – total de mortes) a qual corresponde à única forma possível de crescimento ou redução da população mundial e, quando se analisa o crescimento de áreas específicas devem ser consideradas, também, as migrações. Essas variáveis são representadas pelas equações (1), (2) e (3) na formulação matemática do modelo de equações diferenciais ordinárias. (Quadro 1)

- a **quantidade média de resíduos (*RSUPerCapita*)** gerada por cada habitante multiplicada pela **população total** do município resulta na **quantidade total de resíduos (*GeracaoRSU*)** do município. As variáveis descritas são representadas na equação (4) do modelo matemático do Quadro 1;

- os **fluxos de entrada de resíduos recicláveis nos diferentes tipos de material reciclável (*AcoRecic, AluminioRecic, PapelRecic, PlasticoRecic, VidroRecic*)**, os quais representam a totalidade anual de resíduos sólidos recicláveis de cada um dos diferentes tipos de material e, são obtidos através do produto da **quantidade total de resíduos (*GeracaoRSU*)** pela **taxa percentual de participação do resíduo sólido no total de resíduos gerados** (composição gravimétrica) e, ainda, o produto desse pela **taxa de reciclagem do material** em análise. As equações (Quadro 1) que representam as variáveis relativas aos fluxos de entrada estão descritas no modelo matemático pelas equações (5), (6), (7), (8) e (9);

- a quantidade total acumulada de cada tipo de material reciclado é representada pelas variáveis de nível ***Aco* (aço), *Aluminio* (alumínio), *Papel* (papel/papelão), *Plastico* (plástico) e *Vidro* (vidro)**. As variáveis relativas aos totais acumulados de resíduos recicláveis estão descritas nas equações (10), (11), (12), (13) e (14) no Quadro 1;

- a **quantidade de energia elétrica economizada (*EconomiaEnergia*)** com o processo de reciclagem é obtida através da equação (15) descrita no Quadro 1, a qual para seu cálculo utiliza dados referentes à economia obtida pelos distintos tipos de materiais, bem como a geração total de cada um destes.

Quadro 1 – Formulação Matemática do modelo de simulação desenvolvido

(1)	$Populacao(t) = AcrescPop(t) - DecrPop(t)$
(2)	$AcrescPop(t) = (ImigTaxa * Populacao(t)) + (NascTaxa * Populacao(t))$
(3)	$DecrPop(t) = (EmigTaxa * Populacao(t)) + (MortTaxa * Populacao(t))$
(4)	$GeracaoRSU(t) = Populacao(t) * RSUPerCapita$
(5)	$Aco(t) = AcoRecic(t)$
(6)	$Aluminio(t) = AluminioRecic(t)$
(7)	$Papel(t) = PapelRecic(t)$
(8)	$Plastico(t) = PlasticoRecic(t)$
(9)	$Vidro(t) = VidroRecic(t)$
(10)	$AcoRecic(t) = (GeracaoRSU(t) * TaxaPercAco) * TaxaAcoRecic$
(11)	$AluminioRecic(t) = GeracaoRSU(t) * TaxaPercAluminio * TaxaAluminioRecic$
(12)	$PapelRecic(t) = (GeracaoRSU(t) * TaxaPercPapel) * TaxaPapelRecic$
(13)	$PlasticoRecic(t) = (GeracaoRSU(t) * TaxaPercPlastico) * TaxaPlasticoRecic$
(14)	$VidroRecic(t) = (GeracaoRSU(t) * TaxaPercVidro) * TaxaVidroRecic$
(15)	$EconomiaEnergia(t) = ((Papel(t)/1000) * 3510) + (Aluminio(t)/1000) * 16850 + ((Aco(t)/100000) * 27) + ((Plastico(t)/1000) * 5300) + ((Vidro(t)/1000) * 42)$

Fonte: elaborado pelos autores.

## 4 Validação e Experimentos no Modelo de Simulação

A validação tem recebido atenção em várias áreas de pesquisa, tais como Pesquisa Operacional, sistemas inteligentes e, também, nos sistemas de apoio à decisão. Consequentemente, é difícil encontrar uma definição padrão para “o que é validação”. Para o desenvolvimento da validação do modelo de simulação foi utilizada a abordagem proposta por Finlay (1994) para validações de modelos decisórios e sistemas de apoio a decisão (SAD).

Na primeira fase de validação, ou seja, da validação conceitual do problema, são validados os requisitos funcionais, não funcionais e as variáveis componentes do modelo. Neste momento inicial, foram utilizados dados de artigos científicos, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (MINISTÉRIO..., 2011), de manuais técnicos referentes à área de resíduos sólidos e, contou com a participação de especialistas em gestão ambiental.

Na segunda fase de validação, quando da implementação no simulador Vensim (VENSIM, 2012), foram utilizados dados históricos sobre a população brasileira e gestão de RSU (ABRELPE, 2012; IBGE, 2002; IBGE, 2010; MINISTÉRIO... 2011) para a verificação dos módulos individualmente e sua integração com os demais módulos componentes do modelo (validação analítica). Foram, também, verificados e validados os resultados gerados pelo modelo de simulação e sua conformidade com dados e resultados obtidos no mundo real, denotando a corretude do modelo (validação sinótica). Em ambas as fases os resultados atenderam às expectativas dos projetistas da simulação e especialistas (gestores ambientais).

Na etapa de validação posterior, para a construção do experimento, foram utilizados dados e taxas reais (população, crescimento populacional e dados referentes à gestão dos resíduos sólidos) de um município do Rio Grande do Sul.

Para tal, foram gerados 2 (dois) cenários a serem simulados no modelo: (a) Cenário atual com variação atual das taxas e; (b) cenário positivo, o qual é baseado em taxas crescentes da reciclagem de resíduos, bem como da manutenção estática da taxa de geração de resíduos sólidos por parte da população. Esse tipo de validação pode-se reconhecer como análise de sensibilidade do modelo de simulação, visto que foram utilizadas variáveis controladas nos *inputs* e verificadas as variações nos resultados. O detalhamento e quantificação de taxas para cada cenário simulado são apresentados a seguir na subseção 4.1.

### 4.1 Cenários simulados no modelo

Para melhor descrever os cenários simulados, no Quadro 2 serão apresentadas as taxas básicas referentes ao crescimento populacional, à geração de resíduos, à composição gravimétrica dos materiais reciclados no total de resíduo gerado e a taxa de reciclagem de cada material

analisado pelo modelo. Para obtenção de tais dados foram analisados o Censo Populacional (IBGE, 2010), o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2011 (ABRELPE, 2012) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (MINISTÉRIO..., 2011). Os cenários gerados foram concebidos pelos pesquisadores, com o auxílio de gestores ambientais.

Quadro 2 –Taxas básicas consideradas na simulação

Crescimento Populacional	Foram consideradas as taxas atuais de natalidade e mortalidade, onde o crescimento populacional médio de um município do Rio Grande do Sul foi de 0,7% (IBGE, 2010).
Geração de Resíduos	A taxa média de geração de resíduos urbanos diária é de, aproximadamente, 1,223 kg/pessoa (ABRELPE, 2012). A evolução da geração anual é de 2%.
Composição Gravimétrica do Material nos Resíduos Gerados	As taxas foram obtidas em (MINISTÉRIO..., 2011): Aço – corresponde a 2,3% dos resíduos sólidos gerados. Alumínio – corresponde a 0,6% dos resíduos sólidos gerados. Papel / Papelão – corresponde a 13,1% dos resíduos sólidos gerados. Plástico- corresponde a 19% dos resíduos sólidos gerados. Vidro – corresponde a 2,4% dos resíduos sólidos gerados.
Taxa de Reciclagem do Material	As taxas foram obtidas em (MINISTÉRIO..., 2011): Aço – 35% do aço coletado são reciclados. Alumínio – 36% do alumínio coletado são reciclados. Papel / Papelão – 43% do papel coletado são reciclados. Plástico- 19% do plástico coletado são reciclados. Vidro – 21% do vidro coletado são reciclados.
Economia de Energia Gerada pela Reciclagem	As taxas foram obtidas em (GARBELINI et al., 2011; HISATUGO; MARÇAL JR., 2007; WM, 2012): Aço – 27 Kwh /100 t. Alumínio – 16.850 Kwh / t. Papel / Papelão – 3.510 Kwh / t. Plástico – 5.300 KWh / t. Vidro – 42 Kwh / t.

Fonte: ABRELPE (2012), (IBGE, 2010), (MINISTÉRIO..., 2011), (HISATUGO; MARÇAL JR., 2007), (GARBELINI et al., 2011), (WASTE MANAGEMENT, 2012).

#### 4.1.1 Cenário Positivo

Na concepção do cenário positivo foram simuladas taxas crescentes da reciclagem dos materiais analisados e de sua composição gravimétrica no total de resíduos gerados, em contrapartida, manteve-se estática a taxa de geração *per capita* de resíduos sólidos. O crescimento populacional foi mantido para fins desse cenário simulado. A descrição do cenário pode ser visualizada na Tabela 2.

#### 4.1.2 Cenário Atual da Reciclagem

No cenário atual da reciclagem foram consideradas as taxas de crescimento populacional e de geração de resíduos *per capita*, porém manteve-se estática a composição gravimétrica e, considerou-se um pequeno aumento nos índices de reciclagem do material. O detalhamento do cenário pode ser visualizado no Quadro 3.

Quadro 3 –Taxas básicas consideradas na simulação

Variável	Cenário Atual	Cenário Positivo
<b>Crescimento Populacional</b>	Foram consideradas as taxas atuais de natalidade e mortalidade do município analisado.	Foram consideradas as taxas atuais de natalidade e mortalidade do município analisado.
<b>Geração de Resíduos</b>	Nesse cenário a taxa de geração considerou-se a evolução anual de 2%.	Nesse cenário a taxa de geração permaneceu estática até o fim do tempo simulado e não foi considerada a evolução anual de 2%.
<b>Composição Gravimétrica do Material nos Resíduos Gerados</b>	Nesse cenário inalterou-se o índice de composição gravimétrica dos materiais reciclados com relação à geração de resíduos sólidos.	Nesse cenário foi considerado um aumento de 30% da composição gravimétrica para os dez últimos anos simulados (20 <sup>o</sup> ao 30 <sup>o</sup> ano).
<b>Taxa de Reciclagem do Material</b>	Nesse cenário, considerou-se um aumento de 0,3% nas taxas de reciclagem (ao ano), para cada tipo de material reciclado.	Nesse cenário, nos primeiros dez anos simulados considerou-se que houve um crescimento de 30% na taxa de reciclagem para cada um dos materiais. Do 11 <sup>o</sup> ano ao 30 <sup>o</sup> ano considerou-se um aumento de 50% na taxa de reciclagem, para cada tipo de material.

Fonte: elaborado pelos autores.

## 4.2 Experimento

Definidos os cenários para a realização do experimento com o uso do modelo foram executadas as simulações. Conforme descrito anteriormente, os dados utilizados em ambos cenários foram de um município com, aproximadamente, 265 mil habitantes do interior do Rio Grande do Sul, o qual possui coleta seletiva de resíduos sólidos, bem como unidades de triagem de resíduos sólidos visando à reciclagem dos mesmos. As outras taxas foram obtidas em documentos técnicos, conforme pode ser visualizado anteriormente na seção 4.1. O horizonte de tempo simulado no experimento foi de 30 (trinta) anos, porém a configuração dessa variável fica a cargo dos gestores (possíveis usuários finais) e/ou projetista da simulação.

Na execução das simulações foi utilizado o simulador Vensim (VENSIM, 2012) em uma estrutura computacional com processador Intel Core (*i5 2450*) de 2,5 Ghz, 4 Gb de memória RAM e o tempo de execução da simulação dos dois cenários foi na ordem de milionésimos de segundo. Os resultados obtidos com o uso do modelo são apresentados a seguir na subseção 4.3.

## 4.3 Resultados Obtidos

Com a execução do modelo, vários são os resultados gerados, porém no artigo serão discutidos aspectos referentes à quantidade de resíduos reciclada com relação à geração total de resíduos sólidos, bem como os relacionados à economia de energia elétrica gerada pela reciclagem de resíduos.

Primeiramente, analisar-se-á a quantidade de resíduos reciclada em ambos os cenários, para tal foi considerado o último ano simulado no modelo, ou seja, o 30º ano. Nessa análise verifica-se o alto de índice de reciclagem ocasionado pelo cenário positivo, onde o mesmo atinge a marca de 27,33% de reciclagem dos resíduos gerados (42.670 toneladas). Nessa mesma análise, o cenário atual atinge o índice de 11,76% de reciclagem dos resíduos gerados (24.503 toneladas), o que denota um crescimento de 9,3% ao índice de reciclagem dos dias atuais (aproximadamente 10,7%). Os resultados gerados, bem como o detalhamento da quantidade simulada para cada resíduo individualmente pode ser visualizado na Tabela 1.

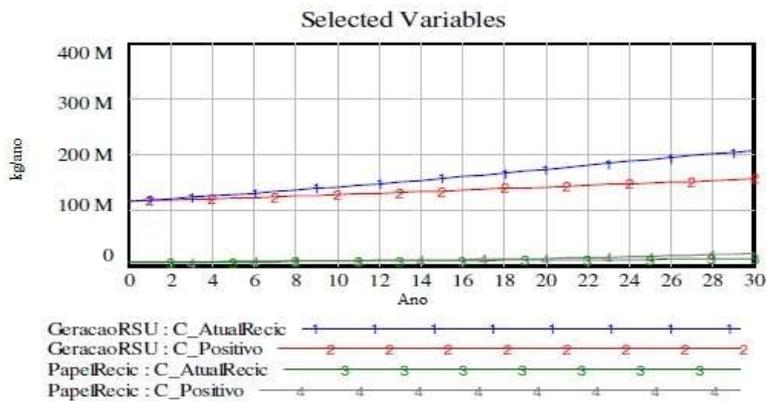
Tabela 1 – Resultados dos cenários no último ano simulado e relação ao total de resíduos gerado

<b>Material</b>	<b>Cenário Atual (Ano 30)</b>		<b>Cenário Positivo (Ano 30)</b>	
	<b>Quantidade Reciclada (kg)</b>	<b>Relação Geração Total (%)</b>	<b>Quantidade Reciclada (kg)</b>	<b>Relação Geração Total (%)</b>
<b>Aço</b>	1.830.390	0,88	3.196.550	2,05
<b>Alumínio</b>	489.992	0,24	876.769	0,56
<b>Papel / Papelão</b>	12.799.600	6,14	22.293.400	14,28
<b>Plástico</b>	8.233.200	3,95	14.306.400	9,16
<b>Vidro</b>	1.149.980	0,55	1.997.090	1,28
<b>TOTAL</b>	<b>24.503.162</b>	<b>11,76</b>	<b>42.670.209</b>	<b>27,33</b>

Fonte: elaborado pelos autores

O cenário positivo com um índice de reciclagem de 27,33% apresenta um excelente crescimento de 153% se relacionado ao índice de reciclagem atual, porém com todo esse crescimento, o índice ainda é menor que o registrado em muitos países europeus. Por exemplo, a Holanda apresenta um percentual de 32% de reciclagem dos resíduos (EUROSTAT, 2011). Para demonstrar o quão pequena é a quantidade de resíduos reciclados no Brasil é apresentado na Figura 2 um gráfico comparativo entre a reciclagem de papel / papelão (resíduo de maior índice de reciclagem) com a geração total de resíduos em todo o período simulado. Ao final do tempo simulado, no cenário positivo, o índice de reciclagem do papel foi de 14,28% (22.203 toneladas), enquanto no cenário atual o índice de reciclagem foi de 6,14% (12.800 toneladas).

Figura 2 – Relação entre a quantidade de papel reciclado e o total de resíduos sólidos gerado



Fonte: elaborado pelos autores.

Uma outra análise executada no modelo de simulação foi a da quantidade de energia elétrica economizada ao longo dos trinta anos simulados, de acordo com os índices apresentados em (GARBELINI et al., 2011; HISATUGO; MARÇAL JR., 2007; WASTE MANAGEMENT, 2012) para cada material analisado. Nessa análise tornam-se evidentes os benefícios da reciclagem de resíduos sólidos ao meio ambiente e à preservação dos recursos naturais, por exemplo, no cenário positivo obtém-se uma economia mensal média de 7.500 Mwh e, no cenário atual, uma economia mensal de 5.800 Mwh. Tais valores são considerados excelentes, pois o consumo aproximado total de uma cidade do porte da analisada é de 82.000 Mwh/mês (CEEE, 2012), assim sendo, estima-se no cenário positivo uma economia de energia elétrica de 9,1% ao mês e, no cenário atual uma economia de 7%. Na Figura 3 apresenta-se o total acumulado de energia elétrica nos anos simulados, onde verifica-se que no cenário positivo o valor é de 2.694.280 Mwh e no cenário atual de 2.108.060 Mwh.

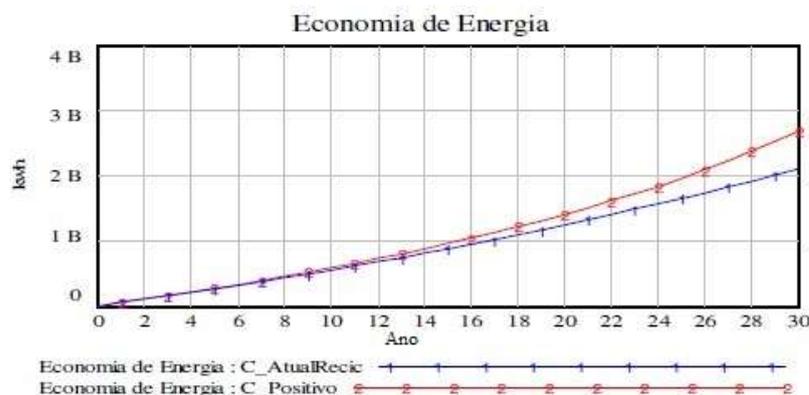


Figura 3 – Economia de energia elétrica acumulada ao longo de 30 anos.

Fonte: elaborado pelos autores.

## 5. Considerações Finais

O objetivo do artigo foi o de apresentar o desenvolvimento, a validação e utilização de um modelo de simulação computacional para auxílio dos gestores ambientais no processo decisório, às políticas referentes à reciclagem de resíduos sólidos. Para o desenvolvimento do modelo foram utilizadas variáveis, tais como, a taxa de crescimento natural populacional (nascimentos e mortes), percentual de resíduo sólido reciclado (para cada tipo de material), composição gravimétrica do material no total de resíduos gerados, quantidade de resíduos gerada por habitante e a economia de energia elétrica ocasionada por cada tipo distinto de material em um determinado período de tempo (que, no modelo desenvolvido, pode variar de minutos a anos).

Através dos resultados gerados pelo modelo, os usuários finais (gestores ambientais) do mesmo poderão, por exemplo, definir incentivos à redução da geração total de resíduos sólidos, incentivos ao aumento das taxas de consumo verde, produzir campanhas valorizando o reuso e a reciclagem de materiais e avaliar os benefícios relativos à economia de energia elétrica ocasionados pela reciclagem.

No artigo foram apresentados dois cenários, nos quais o modelo foi verificado e validado utilizando dados de um município do Rio Grande do Sul - Brasil. Os resultados gerados foram apresentados aos gestores ambientais, os quais testaram o modelo novamente e satisfizeram-se com o mesmo. Os cenários apresentados no artigo foram gerados exclusivamente para a validação do modelo, porém o mesmo pode ser configurado conforme a necessidade do usuário final, tendo em vista o modelo ser aberto e reconfigurável.

Com relação aos resultados produzidos pelo modelo, destaca-se o cenário positivo, pois o mesmo buscou retratar um perfil de população preocupada com as questões ambientais, ou seja, gerando menos resíduo sólido, aumentando a quantidade de resíduo potencialmente reciclável e as taxas de reciclagem. Nessa análise, a quantidade de resíduos reciclados teria um acréscimo de 153% com relação aos padrões vigentes. Quanto ao cenário atual, a quantidade de resíduos reciclados, ao final do tempo simulado, teria um crescimento de 9,3%. Apesar de todo o crescimento ocasionado pelo cenário positivo, com um índice de reciclagem de aproximadamente 27%, o mesmo está bem abaixo de países da comunidade europeia, tais como, Alemanha, Bélgica, Suécia, Holanda e Irlanda, os quais apresentam índices superiores a 30% de reciclagem dos resíduos sólidos gerados.

Quanto à economia de energia elétrica, apesar do cenário positivo gerar uma economia superior (7.500 Mwh/mês ou 9,1%), os padrões atuais (cenário atual) apresentam uma considerável possibilidade de redução de 5.800 Mwh/mês, o que denota a vital importância da reciclagem de resíduos sólidos na busca pelo desenvolvimento sustentável e na Política Nacional de Resíduos Sólidos. Como trabalho futuro pretende-se avaliar, junto à reciclagem, o reuso de material

descartado, bem como a compostagem de resíduos. Por fim, ressalta-se que o modelo, após ser avaliado por gestores da área ambiental, satisfaz a necessidade de informação dos mesmos.

## Referências

- ABELIOTIS, K. et al. **Decision Support Systems in Solid Waste Management: A Case Study at the National and Local Level in Greece**. Global NEST Journal, v.11, n. 2, p. 117-126, 2009.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2012**. ABRELPE, 2012.
- BANI, M.S. et al. The Development of Decision Support System for Waste Management; a Review. World Academy of Science, Engineering and Technology, v.49, p.161-168, 2009.
- CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Balanco Energético** de 2011. CEEE, 2012. Disponível em: <<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/component/Controller.aspx?CC=46490>>. Acesso em: agosto de 2012.
- CHANG, N.; WEI, Y. Siting recycling drop-off in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling. **Fuzzy Sets and Systems**, v.114, p.133-149, 2000.
- COSTI, P. et al. An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. **Waste Management**, v. 24, p.277-295, 2004
- DAELLENBACH, H.G., MCNICKLE, D.C. **Decision making through systems thinking**. Palgrave Macmillan, 2005.
- DYSON, B., CHANG, N.B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste Management**, v.25,n.7, p.669- 679, 2005.
- EUROSTAT- EUROPEAN COMMISSION STATISTICAL. **Environment in the EU27 - Recycling accounted for a quarter of total municipal waste treated in 2009**. Disponível em: <[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_PUBLIC/8-08032011-AP/EN/8-08032011-AP-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_PUBLIC/8-08032011-AP/EN/8-08032011-AP-EN.PDF)> . Acesso em: jun. 2011.
- FINLAY, P. N. **Introducing decision support systems**. Oxford, UK Cambridge, Blackwell Publishers, 1994.
- FORD, A. **Modeling the Environment**. Island Press, 2009.
- GARBELINI, S.M. et al. **Pratique Coleta Seletiva**. Ministério Público de Goiás, 2011.
- GHARAJEDAGHI, J. **Systems thinking: managing chaos and complexity**. 2 Ed. Elsevier, 2006
- HISATUGO, E.; MARÇAL JR, O. Coleta Seletiva e Reciclagem como Instrumentos para Conservação Ambiental: Um Estudo de Caso em Uberlândia – MG. **Sociedade & Natureza**, v.19,n.2, p.205- 216, 2007.
- HUANG, G.H.; BAETZ, B.W.; PATRY, G.G. Trash-Flow Allocation: Planning Under Uncertainty. **Interfaces**, V. 28, N. 6, p. 36-55, 1998.
- IBGE a. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em: jun. 2011.
- IBGE b. **Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm>> . Acesso em: jun. 2011.
- KUM, V.; SHARP, A.; HARNPORNCHAI, N. A System Dynamics Study of Solid Waste Recovery Policies in Phnom Penh City. The 23rd International Conference of the System Dynamics Society, Boston. **Proceedings...** Boston:SDS, 2005.

- LAW, A.M., KELTON, W.D. **Simulation Modeling & Analysis**. 2 Ed., McGraw-Hill, 1991.
- MANSVELT, J. **Green Consumerism: An A-to-Z Guide**. SAGE Publications, 2010
- MINISTÉRIO DAS CIDADES-SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2008**. MCIDADES-SNSA, 2010.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. MMA, 2011.
- MONTEIRO, J.H.P.; et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2001.
- NETTO, A. O Desperdício do Lixo. **Jornal Zero Hora**, 09 de setembro de 2001, Página 32.
- O'LEARY, P.R; et al. **Decision Maker's Guide to Solid Waste Management**. v. 2. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999.
- PIDD, M. **Modelagem Empresarial: Ferramentas para a Tomada de Decisão**. Bookman, 1998.
- SILVA, E.C.P. **O impacto da gestão do tamanho da força policial na taxa de violência em Curitiba: Uma abordagem qualitativa sob o referencial da dinâmica de sistemas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.
- STRAUS, L.M. **Um modelo em dinâmica de sistemas para o ensino superior**. 2010. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- SUFIAN, M.A., BALA B.K. Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. **Waste Management**, v.27, p.858-868, 2007.
- TANSKANEN, J.H. Strategic planning of municipal solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v.30, p.111-133, 2000.
- TUNG, D.V.; PINNOI, A. Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. **European Journal of Operational Research**, v.125, p.449-468, 2000.
- UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Solid Waste Management**. v.1. CalRecovery Inc., 2005.
- VENSIM-VENTANA SYSTEMS. **Vensim Simulation Software**. Disponível em: <<http://www.vensim.com>> . Acesso em: agosto de 2012.
- WASTE MANAGEMENT. **Recycling Facts and Tips**. Disponível em: <<http://sacramentovalley.wm.com/recyclingfacts.asp>> . Acesso em: agosto de 2012.

Recebido: 07/02/2014

Aprovado: 01/06/2014