VII SINGEP
Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade
International Symposium on Project Management, Innovation and Sustainability
ISSN: 2317-8302

GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: CENÁRIOS NA DINÂMICA DE SISTEMAS

EDUARDO TRINDADE BAHIA
IETEC

VINICIUS DE CASTRO TOLEDO
IETEC

WANYR ROMERO FERREIRA
IETEC

THALLES AUGUSTO TISSOT-LARA
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Gestão de resíduos sólidos urbanos: cenários na dinâmica de sistemas

Resumo
O tema da gestão dos resíduos sólidos vem sendo explorado pela academia e pela literatura técnica com significativa ênfase, em razão de sua importância social, econômica e por possibilitar a utilização de variadas aplicabilidades tecnológicas. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Ipatinga - MG. Com o auxílio da técnica de Dinâmica de Sistemas, elaborou-se um modelo computacional para simular diferentes cenários da geração de resíduos sólidos desta cidade. Para ajustar o modelo, realizou-se uma pesquisa junto à empresa gestora do aterro sanitário da cidade. Depois de ajustado o modelo, diferentes simulações foram feitas para permitir uma análise de como reaproveitar esses resíduos. Além do reaproveitamento dos resíduos, foram projetados também os espaços liberados no aterro com os resíduos que deixariam de ser aterrados, e a receita a ser obtida com a venda dos resíduos reciclados. Por meio dos resultados obtidos verificou-se a necessidade da implantação de um programa de coleta seletiva e reciclagem dos resíduos, devido à preocupação que os atores sociais da cidade tem com o volume de resíduos que o aterro recebe anualmente de Ipatinga e das cidades circunvizinhas.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Dinâmica de Sistemas; Cenários; Reciclagem.

Urban solid waste management: scenarios in the dynamics of systems

Abstract

In this work, a study was carried out on the management of urban solid waste in the city of Ipatinga. With the aid of the Dynamics of Systems technique, a computational model was developed to simulate different scenarios of solid waste generation in this city. To adjust the model, a survey was carried out with the company that manages the sanitary landfill in the city. After adjusting the model, different simulations were done for an analysis of how to reuse these residues. In addition to the reuse of waste, the spaces released in the landfill were also projected with the waste that would no longer be grounded and the revenue to be obtained from the sale of recycled waste. The results showed the need to implement a program of selective collection and recycling of waste, due to the concern that the city has with the volume of waste that the landfill receives annually from Ipatinga and the surrounding cities.

Keywords: Solid waste; Systems Dynamics; Recycling

1 Introdução

Os resíduos, em geral, são restos produzidos como consequência indesejada das atividades de qualquer ser vivo. Para sobreviver, os seres humanos transformam determinados produtos que têm à sua disposição em outros assimiláveis, gerando, como consequência, uma parte que é descartada. O aumento da produção de resíduos é um problema de interesse mundial, e a redução do desperdício no ponto onde ele é produzido, assim como sua reciclagem, são as

melhores maneiras de se interromper este processo (Sabata, 2015). A gestão de resíduos sólidos (RS) continua sendo um desafio em áreas urbanas em todo o mundo, particularmente nas cidades que crescem rapidamente e em cidades de países em desenvolvimento (Manaf; Samah & Zukki, 2009).

Segundo Çetinkaya, Levent e Kuzu (2018), a gestão de RS exige planejamento, organização, financiamento e implementação de programas para efetuar a geração, armazenamento, coleta, transporte, processamento, reciclagem e disposição final dos resíduos de forma higiênica. O conhecimento da composição dos RS também é necessário para sua gestão adequada (Crowe, Meyer, & Clapham, 2017). O gerenciamento dos resíduos é o principal desafio a ser enfrentado pelos municípios, pois envolve uma grande despesa e recebe pouca atenção das autoridades responsáveis (Habiba, Majid, Norhakim, & Yamusa, 2018). Este gerenciamento, além dos problemas técnicos, é fortemente influenciado por fatores políticos, legais, socioculturais, ambientais e econômicos. Além disso, esses fatores possuem inter-relações que são, geralmente, parte de um complexo sistema de gestão de resíduos (Trapani, Mannina, Nicosia, & Viviani, 2017).

O uso de ferramentas e técnicas quantitativas na gestão de RS é uma alternativa viável para estudos. Pode-se, com isso, representar por meio de um modelo, uma situação mais próxima do mundo real, que permita estudar o seu comportamento e tomar decisões com base nos resultados obtidos (Simonetto; Löbler, 2013). A gestão de RS é um assunto que vem atraindo a atenção de vários pesquisadores da área de Pesquisa Operacional (PO) e Dinâmica de Sistemas (DS) nos últimos anos (Bani; Rashid; Hamid, 2009). Diversos autores como, Freeman; Yearworth e Cherruault, (2014), Simonetto e Löbler, (2013), Kollikkathara; Feng e Yu (2010) e Chaerul; Tanaka e Shekdar (2008) já utilizaram a técnica de DS para realizar estudos na área de gerenciamento de resíduos sólidos. A Dinâmica de Sistemas possibilita o estudo do comportamento de sistemas ao longo do tempo, de maneira a possibilitar uma estimativa das consequências das decisões que ali serão tomadas (Simonetto & Löbler, 2013). Devido a isso e à necessidade de se estudar o comportamento da geração de resíduos sólidos urbanos em um período futuro, decidiu-se utilizar a metodologia de DS para modelar e simular situações que servirão de base para a tomada de decisões na área de gestão de resíduos sólidos urbanos.

O objetivo deste estudo consiste em utilizar a DS para desenvolver e aplicar um modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Ipatinga, localizada na região centro-leste do Estado de Minas Gerais, denominada Região Metropolitana do Vale do Aço (RMVA).

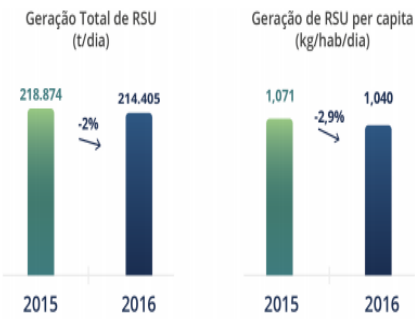
2 Revisão de Literatura

A gestão dos resíduos sólidos tem-se manifestado especialmente complexa, face às diversas nuances envolvidas, nos contextos gerencial, político, econômico, social, tecnológico e da sustentabilidade ambiental. Assim, a literatura pertinente ao tema reflete a diversidade das abordagens, tanto na dimensão teórica como na metodológica. Uma das abordagens exploradas, consiste na classificação destes tipos de subprodutos (White, Franke & Hindle, 2012), (Gundupallia, Hait & Thakur, 2017). No Brasil, os resíduos sólidos são classificados pela ABNT NBR 1004 (2004) em classes, tais como: Classe I – Produtos perigosos, que podem apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, ou ainda os inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos; Classe II – Produtos Não perigosos, que não apresentam nenhuma das características acima, podem ainda ser classificados em dois subtipos: Classe II A – não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classes I e II-B, e

que podem ser combustíveis, biodegradáveis ou solúveis em água; e, Classe II B – inertes, ou seja, resíduos que não interagem com o meio ambiente.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o resíduo como sendo sólido ou semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT NBR 1004, 2004). A Lei nº 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos determina que os resíduos sólidos urbanos (RSU) compreendem o conjunto de resíduos domiciliares e de limpeza urbana (Brasil, 2010). Também são considerados resíduos sólidos urbanos, aqueles provenientes de operações de limpeza de estrada, de áreas verdes, de áreas de lazer e praias, animais domésticos mortos, móveis, ferramentas e veículos abandonados, entulho de obras menores e trabalhos de reparação em residências (Sabata, 2015). No Brasil são gerados, em média, 1,041 kg/hab/dia, totalizando 380 kg/hab/ano. A região Sudeste é a que apresenta a maior taxa de geração, com 1,209 kg/hab/dia. A Figura 1 apresenta o cenário de geração de resíduos sólidos gerados por região, e o total de resíduos sólidos gerados no Brasil, nos anos de 2015 e 2016.



Região	2015	2016	
	RSU Total (t/dia)	Equação*	RSU Total (t/dia)
Norte	12.692	RSU = 0,000174 (pop tot/1000) + 0,551960	12.500
Nordeste	43.894	RSU = 0,000140 (pop tot/1000) + 0,761320	43.355
Centro- Oeste	16.217	RSU = 0,000200 (pop tot/1000) + 0,790890	15.990
Sudeste	104.631	RSU = 0,000139 (pop tot/1000) + 0,855740	102.620
Sul	21.316	RSU = 0,000037 (pop tot/1000) + 0,681342	20.987
Brasil	198.750		195.452

Figura 1: Geração e coleta de RSU no Brasil e por regiões, em 2015 e 2016
Fonte: ABRELPE, 2016

Tabela 1
Quantidade gerada de RSU

Regiões	2012	2013		
	RSU Gerado (t/dia) /Índice (kg/hab/dia)	**População Total (hab)**	**RSU Gerado (t/dia)**	**Índice (kg/hab/dia)**
Norte	13.754 / 0,841	17.013.559	15.169	0,892
Nordeste	51.689 / 0,959	55.794.707	53.465	0,958
Centro-Oeste	16.055 / 1,113	14.993.191	16.636	1,110
Sudeste	98.215 / 1,204	84.465.570	102.088	1,209
Sul	21.345 / 0,770	28.795.762	21.922	0,761
BRASIL	**201.058 / 1,037**	**201.062.789**	**209.280**	**1,041**

Fonte: (ABRELPE, 2013)

Dos resíduos recolhidos no Brasil, 80,3% são recolhidos por caminhões e levados para lixões, aterro ou reciclagem, 9,6% dos resíduos são queimados na própria propriedade, 7,2% são dispostos em caçambas, 2% são jogados em terrenos baldios ou em logradouros e 0,9% são enterrados nas propriedades, jogados em rios, lagos ou mar. O país perde anualmente R$

8 bilhões ao enterrar o lixo que poderia ser reciclado (Adeodato, 2013). De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, divulgado em 2016, houve um aumento em números absolutos e no índice de disposição adequada: cerca de 42,6 milhões de toneladas de RSU, ou 58,7% do coletado, seguiram para aterros sanitários. Por outro lado, registrou-se aumento também no volume de resíduos enviados para destinação inadequada, com quase 30 milhões de toneladas de resíduos dispostas em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2016). Os materiais orgânicos encontrados nas coletas seletivas dos resíduos sólidos urbanos estão destinados à compostagem. Já a parte de materiais recicláveis, como o papel, vidro, plástico e embalagens, são recuperados e reutilizados. A parte orgânica remanescente, que é de baixa qualidade e incapaz de ser destinada a compostagem, pode ser transformada em energia elétrica, por meio da combustão do metano proveniente desses materiais. Os resíduos que não são recicláveis, nem destinados à compostagem e não são utilizados para geração de energia, são compactados e eliminados em uma lixeira controlada, sem efeitos negativos ao meio ambiente (Sabata, 2015).

2.2 Gestão e Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

Para uma abordagem adequada da gestão dos RS, é necessário diferenciar os conceitos de Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Enquanto o primeiro envolve ações voltadas para busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões políticas, ambiental, cultural e social, sob o conceito de desenvolvimento sustentável, o segundo se relaciona ao desenvolvimento, implantação e operacionalização do sistema de manejo dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Dessa maneira, entende-se como modelo de gestão de resíduos sólidos um conjunto de medidas político-estratégicas, institucionais, legais e financeiras capaz de orientar a organização do setor. Deve-se observar a seguinte ordem de prioridade ao se fazer a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final adequada dos rejeitos, de forma a não prejudicar o meio ambiente (FURTADO, 2012). A Figura 2 ilustra a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.

Figura 2 - Prioridade na Gestão e no Gerenciamento de Resíduos Sólidos
Fonte: (BRASIL, 2010)

A previsão da geração de resíduos sólidos urbanos desempenha um papel importante em uma gestão de resíduos sólidos. No entanto, alcançar a precisão da previsão de forma antecipada, é bastante desafiador. Além do crescimento populacional e da migração, o desenvolvimento econômico, o tamanho das famílias, mudanças de emprego, bem como o impacto da reciclagem de resíduos iriam influenciar a geração de resíduos sólidos de forma interativa. Quando os dados não são suficientes para sustentar uma análise de predição estatística, há a necessidade de se trabalhar com modelos dinâmicos, pois esse é capaz de considerar as inter-relações dinâmicas existentes na situação (DYSON; CHANG, 2005).

2.3 Dinâmica de Sistemas

Dinâmica de Sistemas é um método de análise de problemas em que o tempo é um fator importante, envolvendo o estudo de como um modelo pode representar a realidade, por meio de simulações e análises de sensibilidade dos resultados. As simulações são feitas com o auxílio de um programa computacional, assumindo uma visão global da organização, com foco na visão estratégica de gestão (Liu, 2004). Para construir um modelo com Dinâmica de Sistemas (DS), são necessários basicamente quatro componentes: estoques, fluxos, auxiliares e conectores (Simonetto & Löbler, 2013). Para estes autores, a simulação computacional de sistemas é feita por meio de um conjunto de métodos e técnicas matemáticas, com o objetivo de aproximar do comportamento de sistemas reais. Depois de uma análise criteriosa, a técnica de DS permite a construção do modelo, para expressar o problema o mais próximo possível da realidade. A lógica interna e as relações estruturais dentro do modelo são os principais obstáculos envolvidos na sua construção, ficando em segundo plano seu ajuste de acordo com dados históricos (García, 2006).

2.4 Dinâmica de Sistemas na Gestão de Resíduos Sólidos

A metodologia de DS é bastante utilizada na gestão de projetos, bem como no campo da engenharia civil (Morecroft (2015). Há também aplicações voltadas para a gestão de resíduos (Liu, 2004). Nesta aplicação, o modelo é desenvolvido para dar suporte à decisão sustentável da gestão de resíduos sólidos, buscando deduzir as consequências de cada proposta de tratamento e a construção de novas instalações para a disposição final desses. O modelo auxilia o tomador de decisão a compreender melhor os impactos a longo prazo, a planejar de diferentes alternativas de tratamento de resíduos e instalações para a disposição final (Al-khatib; Eleyan & Garfield, 2015). Kollikkathara, Feng e Yu (2010) utilizaram DS como ferramenta de planejamento da gestão sustentável de RSU para modelar e simular variáveis como capacidade do aterro, impactos ambientais e despesas financeiras. Simonetto e Löbler (2013) desenvolveram o modelo de simulação computacional utilizando DS com o objetivo de avaliar e analisar diferentes cenários acerca da geração e destinação final do RSU. Para a validação do modelo foram analisados possíveis cenários futuros, através de dados reais da geração e da disposição final dos RSU de um determinado município.

3 Metodologia

Esta pesquisa se caracteriza, em conformidade com os cânones científicos, como quantitativa, aplicada, descritiva e ex-post-facto. A metodologia utilizada se divide em três partes. A primeira descreve a gestão dos resíduos sólidos de Ipatinga, cujos dados são utilizados no modelo. A segunda parte descreve a elaboração do modelo e a terceira trata dos dados iniciais e os cenários de simulações.

3.1 Elementos da unidade analítica e de observação: o município de Ipatinga e os Resíduos Sólidos Urbanos

A população do município de Ipatinga totaliza 239.468 habitantes, distribuídos da seguinte forma: 98,95% na área urbana e 1,05% na zona rural, de acordo com as informações do Censo Demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). Ainda segundo o órgão a cidade de Ipatinga possui uma taxa de crescimento populacional de 1,9% para os anos seguintes ao ano de 2014, gerando, em média, 4.513

toneladas de resíduos sólidos domiciliares por mês, além de 392 toneladas de resíduos de capina e poda; 4,3 toneladas de resíduos de serviços de saúde; 10.308 toneladas de resíduos inertes, conforme dados de pesagens realizadas na Central de Resíduos Vale do Aço (CRVA) no ano de 2014. Cerca de 48 toneladas do total de resíduos sólidos domiciliares gerados são reciclados, representando um índice médio de 1,1%. Na cidade não há programa de coleta seletiva formalizado pelo município e as ações de coleta dos recicláveis são realizadas pela ASCARI e AMAVALE, associações de catadores de materiais de materiais recicláveis instaladas no município, que contam com o apoio da prefeitura. A Tabela 2 apresenta a quantidade de resíduos sólidos gerados na cidade de Ipatinga no ano de 2014.

Tabela 2
Quantidade de Resíduos Sólidos Gerados na Cidade de Ipatinga

Tipo de Resíduo	**Total anual (Toneladas)**	**Média Mensal (Toneladas)**	**Média Diária (Toneladas)**
Domiciliar	54.153,88	4.512,82	150,43
Capina e poda	4.702,32	391,86	13,06
Resíduos de Serviços de Saúde	52,16	4,35	0,15
Inertes	123.690,98	10.307,58	343,59
Materiais Diversos	5,46	0,46	0,015
TOTAL	**182.604,80**	**15.217,07**	**507,24**

Fonte: (ENGECORPS, 2015)

Em média, a geração *per capita* de resíduos sólidos domiciliares é de 0,589 kg/hab/dia e de 0,006 kg/hab/dia de materiais recicláveis. A geração dos resíduos sólidos domiciliares é inferior às médias nacionais e da região Sudeste, de 1,041 kg/hab/dia e 1,209 kg/hab/dia, respectivamente. (ABRELPE, 2013). Em relação à composição gravimétrica dos resíduos, um estudo feito por Sabino (2009) na Região Metropolitana do Vale do Aço (RMVA), com amostras dos resíduos dos municípios de Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Timóteo, identificou que os resíduos sólidos urbanos apresentam, em média, 23,9% de materiais potencialmente recicláveis; 63,8% de matéria orgânica e 12,3% de outros materiais considerados rejeitos. De acordo com a Tabela 3, esses valores estão bem próximos da média nacional.

Tabela 2
Composição Gravimétrica Média dos RSU da RMVA e Brasil

Material	**Média na RMVA (%)**	**Média Nacional (%)**
Matéria Orgânica	63,8	64,0
Plástico	9,5	4,7
Papel / Papelão	9,3	13,5
Vidro	1,3	1,5
Metal	3,8	1,5
Outros	12,3	14,8
TOTAL	**100,0**	**100,0**

Fonte: (SABINO, 2009)

3.2 Elaboração do Modelo

Neste item é apresentado o detalhamento da elaboração do modelo utilizado para fazer a gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Ipatinga. Para sua criação, utilizou-se a técnica de Dinâmica de Sistemas (DS). O modelo computacional foi elaborado com o auxílio do programa VENSIM, da *Ventana Systems, Inc.* (www.vensim.com). Este programa integra em um ambiente, um poderoso conjunto de ferramentas que inclui diagramas de causa e efeito, construção gráfica e textual do modelo, fácil reprodução, otimização e manipulação de dados (VENTANA SYSTEMS, 2014).

3.2.1 Fluxos de Resíduos Sólidos Administrados na Central de Resíduos do Vale do Aço

A Figura 3 mostra os fluxos de Resíduos Sólidos (RS) administrados na CRVA.

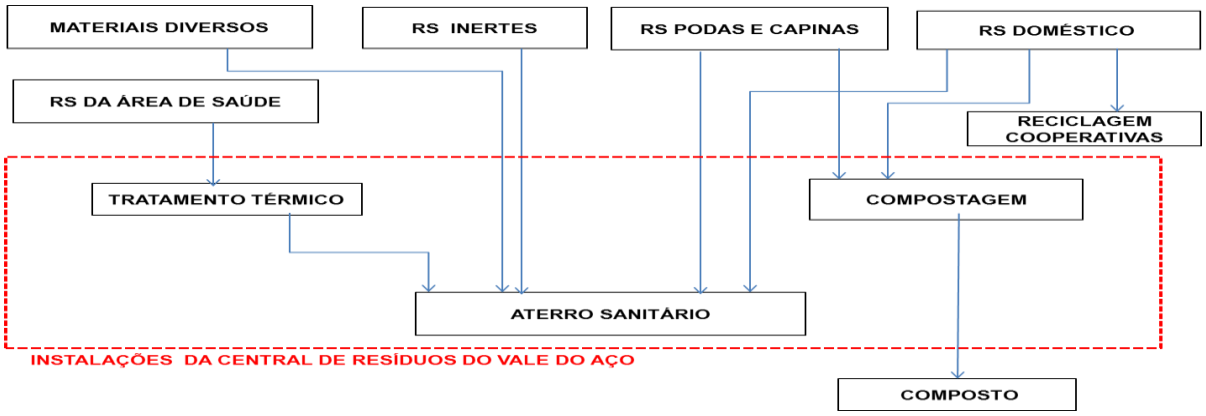


Figura 3 - Fluxo de RS administrados na CRVA
Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

3.2.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

O diagrama de estoque e fluxo elaborado no Vensim, foi dividido em três submodelos, permitindo visualizar os principais elementos que compõem o modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Ipatinga. Por meio do diagrama de estoque e fluxo é possível representar matematicamente toda a estrutura do modelo, permitindo quantificar as inter-relações existentes entre os elementos do sistema. A Figura 4 apresenta o submodelo Geração de Resíduos Sólidos Domésticos (RSD).

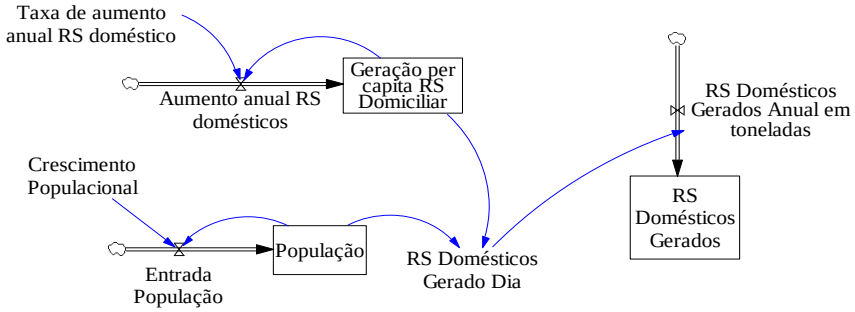


Figura 4 – Submodelo Geração de RSD
Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

A Figura 5 apresenta o submodelo "Reaproveitamento de RSU". Neste submodelo são calculadas as quantidades de materiais possíveis de se obter com o reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos.

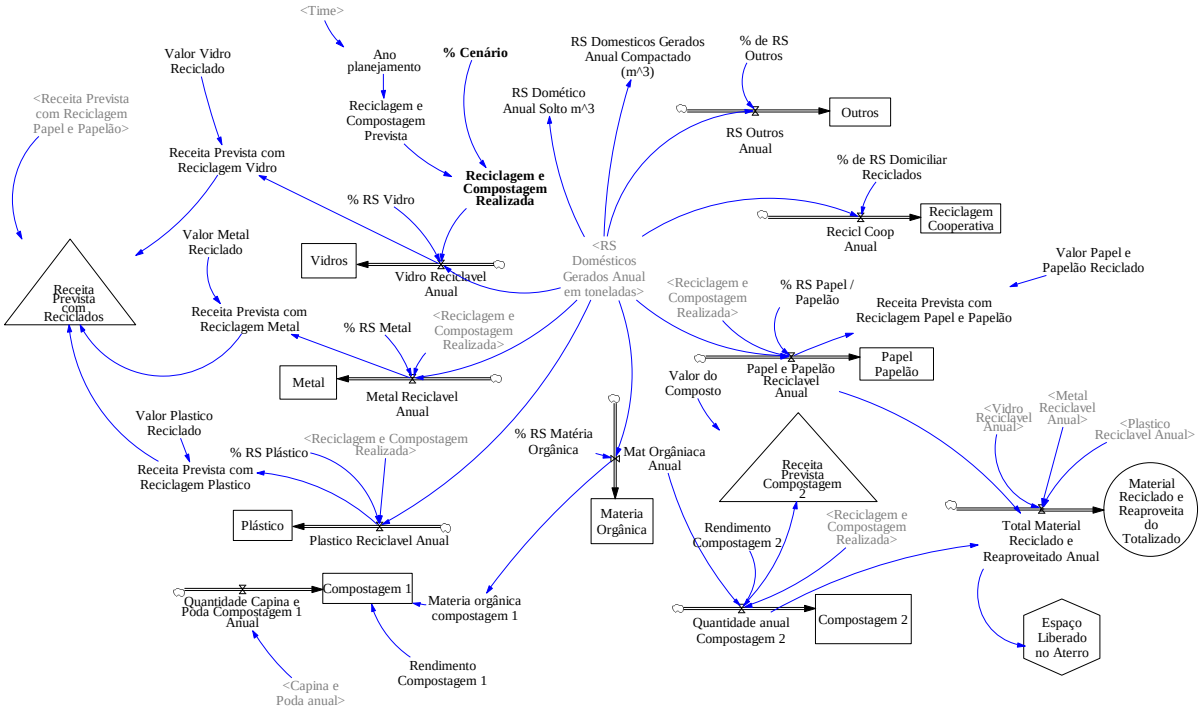


Figura 5 - Submodelo Reaproveitamento de RSU
Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

A Figura 6 apresenta o submodelo "Disposição Final". Nela considerou-se, junto com os RSD, os outros tipos de resíduos que também são aterrados na CRVA, que são: resíduos de capina e poda, resíduos de serviço de saúde, resíduos inertes e materiais diversos. Além de quantificar o total de RSU aterrados, esse submodelo também modela o volume total, em m³, de resíduos que são compactados e aterrados.

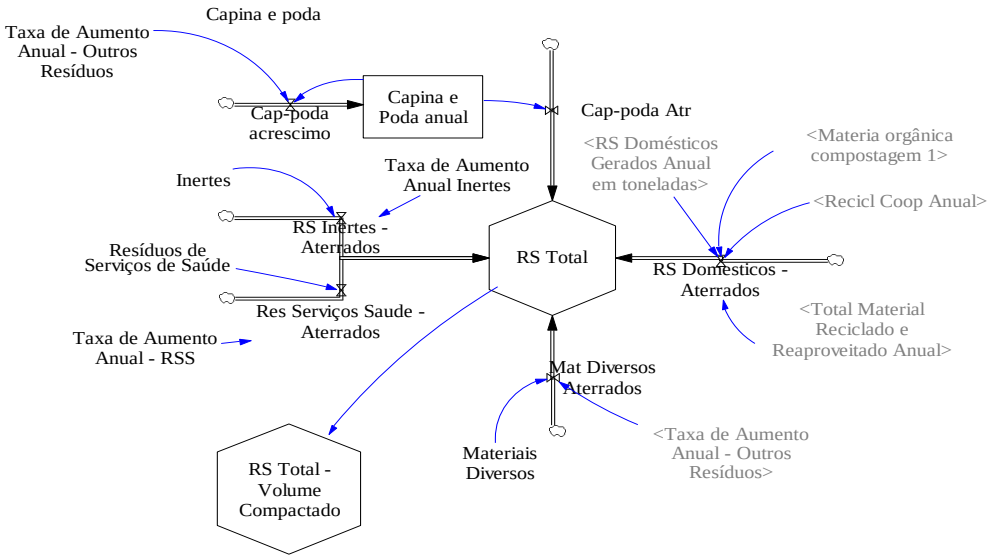


Figura 6 - Submodelo Disposição Final
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018

3.3 Dados Iniciais e Cenários

O modelo foi ajustado para simular várias situações diferentes (cenários) em um período de 24 anos. Engecorps (2016) propõe progressões para a implementação do reaproveitamento dos RSU na cidade de Ipatinga nos próximos 20 anos, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 3
Progressões para a implementação do reaproveitamento dos RSU

Faixas ano planejamento		Faixas de reaproveitamento Propostas (%)		Variação anual de reaproveitamento (%)	Constante
Ano inicial	Ano final	% ano inicial	% ano final		
1	4	0	0,298	0,099333333	-0,0993333
5	9	0,299	0,388	0,022250	0,18775
10	14	0,389	0,424	0,008750	0,3015
15	20	0,425	0,5	0,0150	0,2

Fonte: Elaborado pelos autores (2018) com base em ENGECORPS, (2016)

A % de reaproveitamento é calculada em função do ano de planejamento como na equação 1.

$$\%\ \text{de reaproveitamento} = \text{Variação anual de reaproveitamento} * \textit{ano de planejamento} + \textit{constante} \quad (1)$$

Os cenários utilizados para as simulações foram:

- **Cenário 1:** neste cenário não há reaproveitamento, ou seja, o valor da eq. 1 é multiplicado por zero.
- **Cenário 2:** neste cenário há reaproveitamento de 25% do valor do reaproveitamento proposto por ENGECORPS (2016), ou seja, o valor da eq. 1 é multiplicado por 0,25.
- **Cenário 3:** neste cenário há reaproveitamento de 50% do valor do reaproveitamento proposto por ENGECORPS (2016), ou seja, o valor da eq. 1 é multiplicado por 0,50.
- **Cenário 4:** neste cenário há reaproveitamento de 100% do valor do reaproveitamento proposto por ENGECORPS (2016), ou seja, o valor da eq. 1 é multiplicado por 1,0.

4 Resultados e Discussão

4.3Ajuste do Modelo e Simulações

Ajustou-se o modelo utilizando os dados de geração de resíduos sólidos urbanos da cidade de Ipatinga, obtidos na empresa Vital Engenharia Ambiental, gestora da CRVA, e também a geração média de resíduos sólidos urbanos do Brasil, em um período de nove anos. A Tabela 6 apresenta a projeção da geração de resíduos sólidos feita pela gestora da CRVA e a projeção proposta pelo modelo elaborado em DS.

Tabela 6

Projeção da geração de RSU Vital Engenharia e projeção modelo em DS

Projeção	Ano	2014	2018	2022	2026	2030	2036	2037
Projeção Vital Engenharia Ambienta	**População (hab)**	255.266	275.226	296.747	319.951	344.969	386.211	393.549
	RS Domésticos (kg/dia)	150.607	162.383	175.081	188.771	203.532	227.865	232.194
	Vol. Lixo Comp. (m^3/dia)	215.153	231.976	250.116	269.673	290.760	325.521	331.706
	Volume Lixo Solto (m^3/dia)	602.428	649.532	700.324	755.084	814.128	911.460	928.776
Projeção Modelo em DS	**População (hab)**	255.266	275.423	297.171	320.636	345.954	387.729	395.166
	RS Domésticos (kg/dia)	150.352	162.224	175.034	188.855	203.767	228.372	232.753
	Vol. Lixo Comp. (m^3/dia)	214.788	231.748	250.048	269.792	291.096	326.246	332.504
	Volume Lixo Solto (m^3/dia)	601.407	648.896	700.134	755.419	815.069	913.490	931.012

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Pode-se observar na Tabela 6 que os valores das projeções da população, volume de lixo compactado e volume de lixo solto feitas pela Vital Engenharia Ambiental e os valores obtidos através do modelo de gestão de resíduos sólidos urbanos ficaram próximos, apresentando uma diferença menor que 0,001% entre elas.

4.4Comparação entre os cenários

Neste subcapítulo foi feita uma comparação entre os cenários anteriores para que se possa ter uma visão geral das simulações. A Figura 7 apresenta a comparação entre a quantidade de RSD aterrada de todos os cenários.

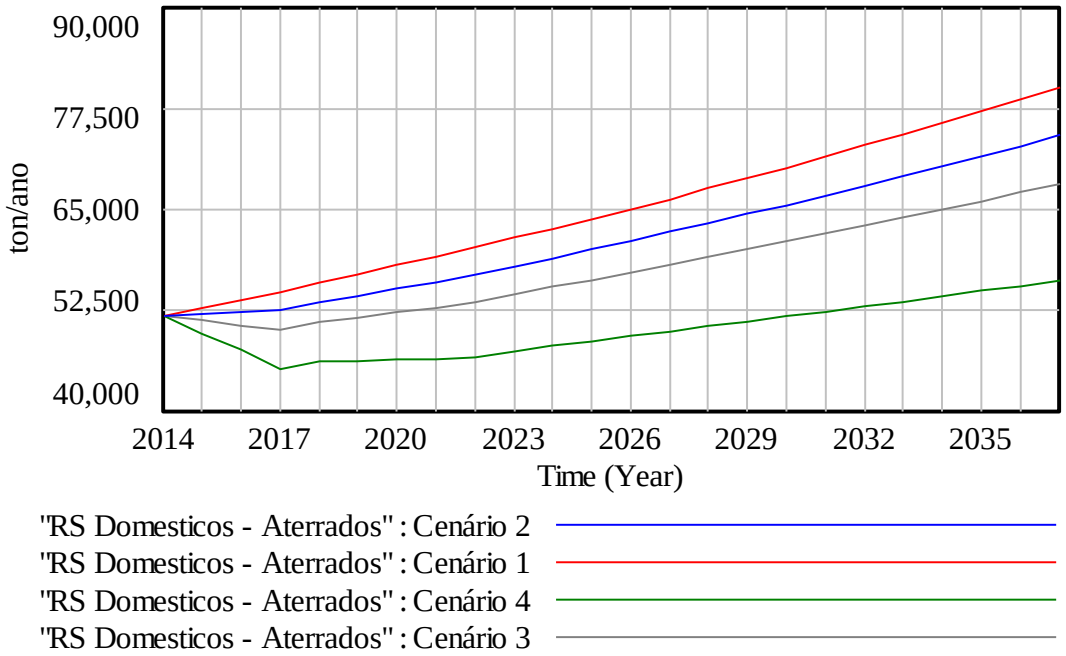


Figura 7 - Comparação entre a quantidade de RSD aterrados para os 4 cenários

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Pode-se observar que a quantidade de RSD aterrada diminui a cada cenário. No cenário 1, a quantidade de RSD aterrada até o ano de 2037 foi de 80.196,4 t, no mesmo ano, foram aterradas 74.203,6 t no cenário 2. Já no cenário 3, a quantidade de RSD aterrada no ano de 2037 foi de 68.210,7 t e no cenário 4, considerando-se o mesmo ano, foram aterradas 56.224,9 t de RSD, considerando-se para todos os valores o ano 2037 da simulação. Diante desta diminuição de RSD aterrados, pode-se observar na Figura 9 que o volume utilizado no aterro também diminui, e consequentemente, os espaços liberados aumentam, como pode ser visto na Figura 10. O volume utilizado no cenário 1 foi 1.207.410 m³ e não havia projeção de espaço liberado, uma vez que todos os RSD eram aterrados. No cenário 2, o volume utilizado foi de 1.198.850 m³ e liberaram-se 8.561,25 m³ de espaço no aterro. No cenário 3, o volume utilizado foi 1.190.290 m³ e o espaço liberado foi de 17.122,5 m³. Por fim, no cenário 4 o volume utilizado foi de 1.173.170 m³ e o espaço liberado no aterro foi de 34.245 m³. Para todos os valores foi considerado o ano 2037 da simulação.

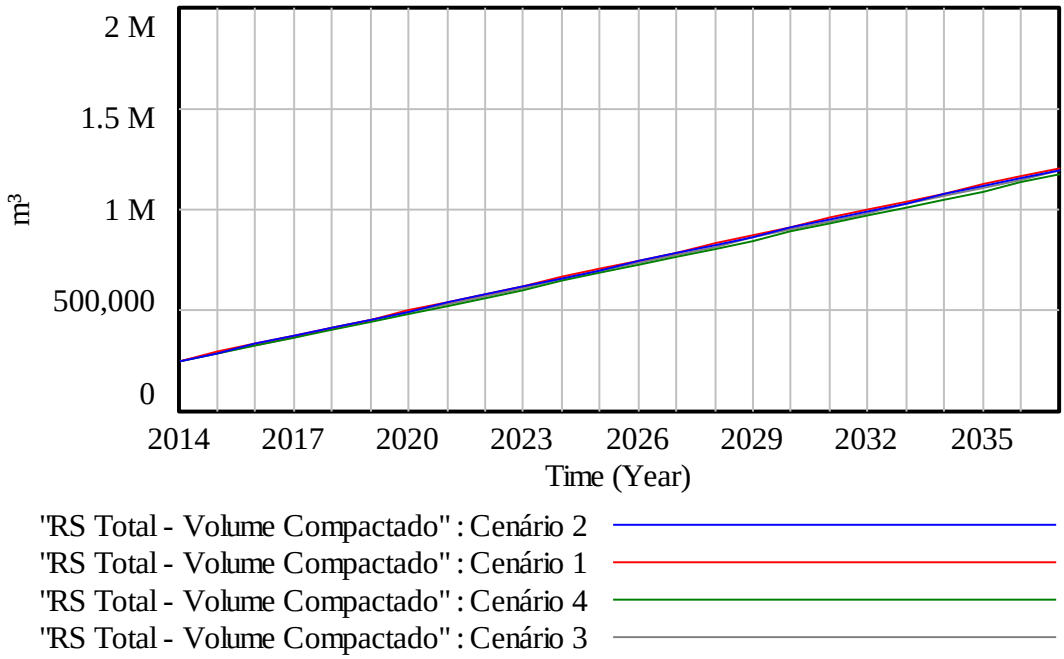


Figura 8 - Comparação do Volume utilizado no aterro para os 4 cenários

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

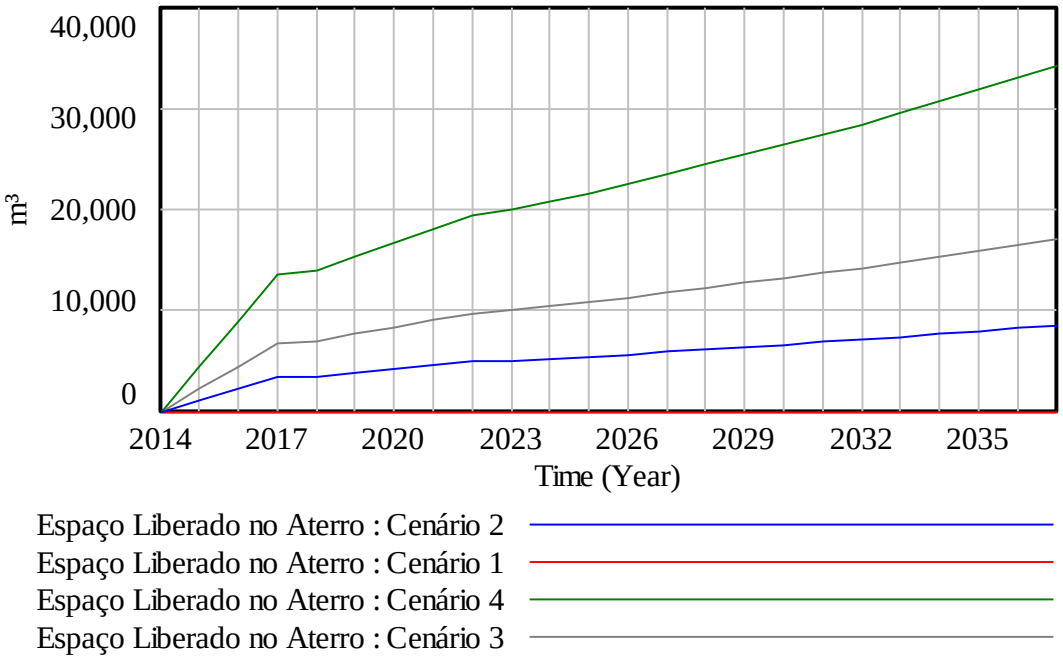


Figura 9 - Comparação entre os espaços liberados para os 4 cenários

Fonte: Elaborado pelos es (2018)

Em relação à receita obtida com a reciclagem dos resíduos e com a compostagem, pode-se observar na Figura 10, os resultados para os 4 cenários.

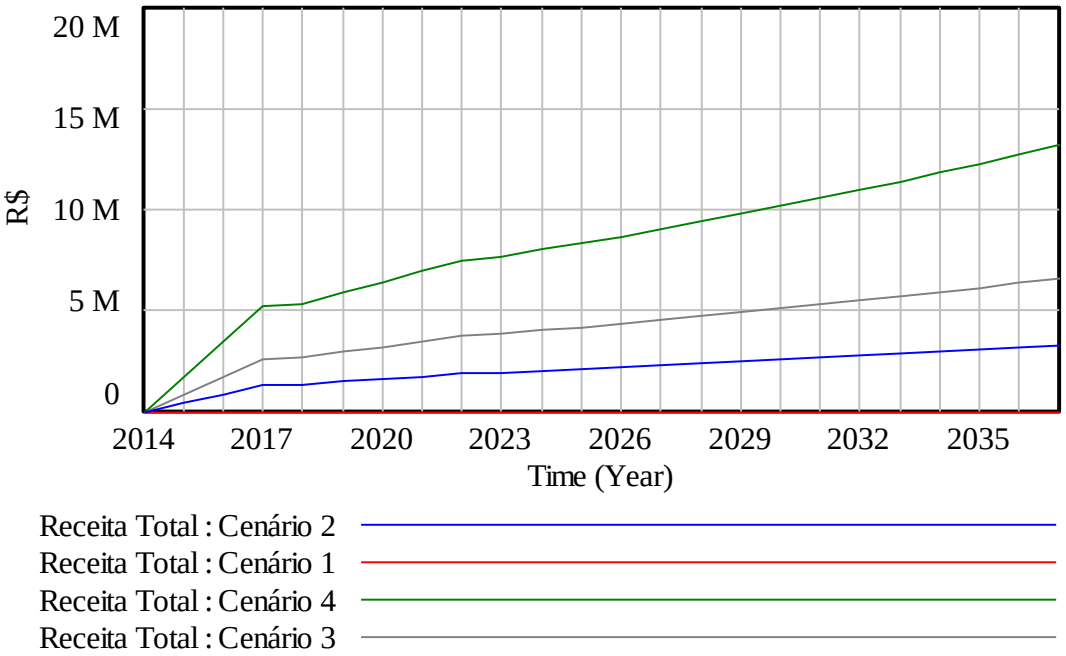


Figura 10 – Comparação da receita total para os 4 cenários

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Observa-se que o aumento da reciclagem a cada cenário faz com que a receita também aumente de forma proporcional aos espaços liberados no aterro (ver figura 10). Verifica-se que, mesmo com a reciclagem e compostagem de resíduos a diferença no volume compactado no aterrado é pequena. Isto ocorre porque 68 % dos RSU são de materiais inertes, ao passo que os RSD representam 30 % e os outros resíduos 2 %.

5 Considerações finais

Utilizou-se, neste trabalho, a técnica de dinâmica de sistemas para analisar problemas de gestão de resíduos sólidos e prever possibilidades de reaproveitamento de RSD em Ipatinga, MG. O modelo desenvolvido permitiu a determinação da evolução da geração de RS considerando o aumento da população e o aumento da quantidade de geração de resíduos *per capita* ano. Assim, foi possível fazer a projeção e realizar diferentes simulações que visam auxiliar a tomada de decisões na área de gestão de resíduos sólidos urbanos. Os resultados das simulações feitas nos quatro cenários mostram que a geração de resíduos sofre um aumento durante o período de simulação devido à taxa de crescimento populacional de Ipatinga e ao aumento da geração *per capita* de RSD. Este aumento pode se tornar um problema para o município, pois o aterro instalado na cidade atende também cidades circunvizinhas, totalizando uma população de aproximadamente 774.000 habitantes.

Uma solução para o problema de ocupação do aterro seria a implantação de um programa de reciclagem e reaproveitamento dos resíduos, pois assim os resíduos que forem reciclados não seriam aterrados na CRVA liberando espaços no aterro. A reciclagem e reaproveitamento desses resíduos devem considerar todos os resíduos e não se limitar aos RSD, que representam apenas 30% do total dos resíduos gerados.

A simulação de cenários, tal como a que foi desenvolvida neste estudo, tem sido cada vez mais explorada tanto como campo analítico na pesquisa acadêmica, quanto para facilitar as decisões de executivos em setores públicos e privados (Morecroft, 2015). Neste contexto,

novas teorias e novas tecnologias vêm sendo amplamente desenvolvidas e contrastadas, demonstrando suas conveniências e aplicabilidades (White, Franke, & Hindle, 2012). Assim, este estudo apresenta como contribuição à literatura, a aplicabilidade de uma metodologia robusta e importante, sendo executada em um setor crítico dos negócios públicos e privados, demonstrando sua viabilidade pragmática. A técnica de Dinâmica de Sistemas utilizada na configuração do modelo foi muito útil para compreender e executar a gestão de resíduos sólidos urbanos e, assim, foi possível fazer a projeção e realizar diferentes simulações que facilitam a tomada de decisões na área de gestão de RSU. A modelagem de sistemas dinâmicos oferece uma abordagem lógica e consistente para o estudo de gestão de resíduos, diminuindo as incertezas sobre a projeção de geração, reaproveitamento e destino final desses resíduos.

Como recomendações para trabalhos futuros destaca-se que nas simulações podem ser consideradas variáveis para a projeção de geração de resíduos, como a classe econômica da população e as taxas de migração. Para a obtenção de dados mais realistas, sugere-se que os materiais estudados (vidro, metal, plástico, papel e papelão) sejam divididos em subgrupos dentro das categorias.

Referências

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015 (2015). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil p. 92, 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. 2179-8303.

ABNT NBR 1004. Classificação De Resíduos Sólidos Norma ABNT NBR 10.004:2004.(2004). São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <www.abetre.org.br>. Recuperado em 14/07/2018

Adeodato, S. (Coord.) (2013) CEMPRE Review. São Paulo: [s.n.], Disponível em: <www.cempre.org.br>. Recuperado em 14/07/2018

Afşın, Y. Ç., Bilgili, L., & S, L. K. (2018). Life cycle assessment and greenhouse gas emission evaluation from aksaray solid waste disposal facility. Air Quality, Atmosphere, & Health, 11(5), 549-558. doi:http://dx.doi.org/10.1007/s11869-018-0559-3

Al-khatib, I.A. Eleyan, D.; Garfield, J. (2015). System Dynamics Model To Predict Municipal Waste Generation and Management Costs in Developing Areas. Journal of Solid Waste Technology and Management v. 41, n. 2, p. 109–120

BRASIL. (02 de Ago de 2010). Lei nº 12.305/2010. *Política Nacional de Resíduos*, p. 72.

Bani, M.S; Rashid, ZA; Hamid, KHK. (2009). The development of decision support system for waste management; a review. World Academy of Science, Engineering Technology v. 3, n. 1, Disponível em: <http://www.waset.org/publications/7145>.6035543634. Recuperado em 14/07/2018

ChaeruL, M.; Tanaka, M.; Shekdar, A. V. (2008). A system dynamics approach for hospital waste management. Waste Management v. 28, n. 2, p. 442–449, 2008.0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.01.007.

Crowe, C., Meyer, C. K., & Clapham, S. E. (2017). The strategy of sustainable waste management: Landfill management, recycling, reduction, and pollution prevention. Journal of Business Case Studies (Online), 13(1), 5-22. doi:http://dx.doi.org/10.19030/jbcs.v13i1.9857

ENGECORPS. (2016) *Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Ipatinga* . [S.l: s.n.].

Freeman, R.; Yearworth, M.; Cherruault, J. (2014). Review of Literature on Systems Thinking and System Dynamics for Policy Making Prepared for Department for Environment, Food and Rural Affairs. University of Bristol, 42-46 p.

Furtado, A.(Dir.) (2012). Política Nacional de Direcionamento Resíduos Sólidos (PNRS). Centro de Documentação e Informação Edições Câmara,1-72 Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/Home/Extensao/ProjetoColetaSeletiva52/politica_residuos_solidos.pdf>. 9788573659726.

García, J. M. (2006). Theory and Practical Exercises of System Dynamics. First ed. Barcelona, Spain: Juan Martín García, 1-292 p. ISBN 8460998045.

Gomez, G.; Meneses, M.; Ballinas L. & Castells F. (2008). Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. Waste Management v. 28, n. 12, p. 2465–2471, 2008. 0956-053X (Print)r0956-053X (Linking). DOI: 10.1016/j.wasman.2007.10.023

Gundupalli, S.P.; Hait, S.; Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. Waste Management Vol. 60, Feb. p. 56-74. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.015. Recuperado em 14/07/2018

Habiba, I. M., Majid, Z., Norhakim, B. Y., & Yamusa, B. Y. (2018). Analysis of multi-criteria evaluation method of landfill site selection for municipal solid waste management. Paper presented at the , 34 doi:http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20183402010 Retrieved from https://search.proquest.com/docview/2038407777?accountid=42153

IBGE. Censo Demográfico. Estatísticas do registro civil 2010 v. 41, p. 1–270 , 2010.9788524042225.

Kollikkathara, N.; Feng, H.; Yu, D. (2010). A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. Waste Management v. 30, n. 11, p. 2194–2203, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.

Manaf, L.A,; Samah, M. A.; Zukki, N. I.(2009). Municipal solid waste management in Malaysia: Practices and challenges. Waste Management v. 29, n. 11, p. 2902–2906 ,2009.0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.07.015

Morecroft, J. D. W. (2015). Strategic Modelling and Business Dynamics: A feedback systems approach. New York. Wiley.

Sabata, J. M. C. (Coord.). (2005). Urban Solid Waste Management. March 2005 ed. Barcelona, Spain: World Association of the Major Metropolises. Disponível em: <www.metropolis.org>. .84-609-5022-0.

Simonetto, E. O.; Löbler, M. L. (2013) Simulação baseada em System Dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos. Produção v. 24, Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013005000034&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>.

Trapani, D. D., Mannina, G., Nicosia, S., & Viviani, G. (2018). Biogas from municipal solid waste landfills: A simplified mathematical model. *Water Science and Technology*, *77*(10), 2426-2435. doi:http://dx.doi.org/10.2166/wst.2018.193

Venkat, K. (2005). Municipal Recycling : A System Dynamics Model. Biocycle p. 1–32. Disponível em: (http://www.jgpress.com/archives/_free/000089.html). Recuperado em 14/-7/2018

Ventana Systems, Inc. *Vensim Simulation Software*. Disponível em: <http://www.ventanasystems.com/software_vensim/>. Acesso em: 22 abr. 2016.

White, P.R; Franke, M. & Hindle, P. (2012). *Integrated Solid Waste Management – a lifecycle inventory*. London. Blackie Academic & Professional. DOI: 10.1007/978-1-4684-6785-5