



PROPOSTA DE UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DOMICILIARES: UM ESTUDO APLICADO A CURITIBA (BRASIL) A LUZ DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

PROPOSAL FOR A SYSTEM DYNAMICS MODEL FOR SOLID URBAN HOUSEHOLD WASTE MANAGEMENT: A STUDY APPLIED TO CURITIBA (BRAZIL) IN THE LIGHT OF THE NATIONAL SOLID WASTE POLICY (PNRS)

Recebimento: 01/05/2022

Aceite: 15/03/2023

Christian Luiz da Silva¹

Gabriel Massao Fugii²

Alain Hernández Santoyo³

Resumo

O aumento da geração dos resíduos sólidos urbanos se tornou um problema para a gestão das cidades e necessita de formas para o seu equacionamento e disposição ambientalmente segura. Trata-se de um problema presente em todos os países que buscam diferentes formas de equacionar. No Brasil, estes preceitos decorrem da Lei Federal nº. 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2010. A gestão brasileira aplicada atualmente não consegue atender as prioridades estipuladas pela Lei, sendo caracterizada por ser ineficaz e onerosa, como demonstra a pesquisa que avalia a política municipal da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos das capitais brasileiras. A falta de gestão de resíduos gera uma série de problemas ambientais, sociais e econômicos. O objetivo foi propor um modelo de dinâmica de sistemas da gestão de resíduos sólidos urbanos aplicado ao município de Curitiba a luz dos preceitos da PNRS. O estudo é descritivo e utilizou entrevistas semiestruturadas, pesquisa bibliográfica e documental como técnicas para obtenção de dados primários e secundários para elaboração da proposta do modelo. A elaboração do modelo seguiu a metodologia da dinâmica de sistemas com aplicação do

¹ Doutorado em Engenharia da Produção (UFSC). Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR, Brasil. E-mail: christiansilva@utfpr.edu.br

² Doutor em Tecnologia e Sociedade (UTFPR). Curitiba – PR, Brasil. E-mail: gabrielfuggi@gmail.com

³ Doutor em Ciências Econômicas (UA). Professor na Universidade Federal de Alfenas. Varginha – MG, Brasil. E-mail: santoyocuba@gmail.com

estudo de caso em Curitiba. A execução do modelo possibilitou demonstrar a integração e interação entre as diversas variáveis que envolvem a questão da gestão de resíduos sólidos urbanos. Em comparação ao modelo em vigor, pode-se verificar que a estruturação desta dinâmica de sistemas permitiu compreender que há alternativas para uma gestão mais alinhada com os preceitos da PNRS.

Palavras-chave: Gestão de resíduos sólidos urbanos. Dinâmica de sistemas. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Cidades. Curitiba.

Abstract

The increase of urban solid waste generation has become a problem for cities management and needs ways to solve and dispose it in an environmentally safe way. This fact is an existing problem for all countries that find different ways for solving. In Brazil, these precepts derive from Federal Law No. 12.305, which instituted the National Solid Waste Policy (PNRS), in 2010. Nowadays, the brazilian management applied cannot meet the priorities stipulated by the Law, being characterized as ineffective and costly, as demonstrated by the research that evaluates the municipal policy for the integrated management of urban solid waste system in brazilian capitals. The absence of waste management generates several environmental, social and economic problems. The objective was to propose a system dynamic model for urban solid waste management applied to the municipality of Curitiba, supported by the PNRS precepts. This study is descriptive and used semi-structured interviews, bibliographic and documentary techniques to obtain primary and secondary data for constructing the proposed model. The model design followed the systems dynamics methodology with application of case study in Curitiba. The model execution provided to demonstrate the integration and interaction between the several variables that involve the urban solid waste management. Compared to the existent model, it can be verified that the structuring of this system dynamics allowed us to understand that there are alternatives for a management more aligned with the PNRS precepts.

Keywords: Urban solid waste management. Systems dynamics. National Solid Waste Policy. Cities. Curitiba.

Introdução

As cidades são caracterizadas por serem “os principais centros de produção de resíduos, devido sua concentração econômica e o número de habitantes” (PEREZ 2012, p. 98). O comportamento de aquisição de produtos e consequente geração de resíduos, é incentivado por publicidades consumistas, disseminadas pelos diversos meios de comunicação de massa (HORKHEIMER; ADORNO, 1991). Elas criam necessidades, algumas artificiais, estimulando os indivíduos a obterem novos produtos (MATTOS, 2006), realizando esta ação de forma natural e diariamente, sem pensar (BAUMAN, 2008).

A geração dos diversos tipos de resíduos é uma realidade e o seu crescimento é uma realidade, não somente no Brasil. Em 2010, a geração per capita médio de massa coletada em relação à população urbana era 0,93 kg/ habitante por dia e em 2021 aumentou para 1,01 (BENSEN, JACOBI, SILVA, 2021; SNIS, 2021). Isso demonstra que um dos indicadores básicos (a não geração) continua com resultados negativos, assim como outros indicadores que estão muito aquém do esperado após mais de 10 anos da sanção da Política Nacional de Resíduos Sólidos. A gestão de resíduos sólidos necessita da atenção e atuação tanto do poder público como da sociedade (MONTEIRO *et al.*, 2001), bem como buscar novas alternativas para esse processo de planejamento e gestão (SILVA, 2019).

Othman *et al.* (2012) e Economopoulos (2012) apresentam modelos de gestão de resíduos aplicados nos países desenvolvidos, com aproveitamento energético e utilização de diversas tecnologias, as quais reduzem a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários. Contudo, estes estudos sobre proposição de modelos possuem realidades que não incluem algumas características brasileiras, apesar de alguns trabalhos envolverem pesquisas em países da América Latina (GUERRERO *et al.*, 2013). Outros tratam de situações específicas, como a reciclagem, mas não especificamente sobre como analisar o desenvolvimento das políticas municipais de resíduos sólidos urbanos, considerando a composição predominantemente orgânica dos resíduos e a falta de uma segregação correta (MASSUKADO, 2008).

Silva *et al.* (2015) fazem uma proposição de variáveis chaves para compreender a dinâmica da gestão de resíduos sólidos municipais, porém não propõem um modelo de análise. Além disso, Silva (2016) reforça a necessidade de compreensão da realidade brasileira e aponta um alto custo da gestão de RSU, além da baixa recuperação e reciclagem de materiais. O autor chama atenção para uma perda financeira dupla, ou seja: enterram-se materiais com valor econômico; e se perder com os ganhos dos recursos que poderiam retornar para o sistema produtivo seguindo a lógica de economia circular.

Entretanto, a proposição de um modelo de análise a luz da realidade brasileira é relevante para que se possa compreender a dinâmica das políticas municipais a partir da implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Jacobi e Besen, 2011; Massukado, 2008; Monteiro *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2015).

O objetivo foi propor um modelo de dinâmica de sistemas da gestão de resíduos sólidos urbanos aplicado ao município de Curitiba, baseado em dinâmicas de sistemas a luz dos preceitos da PNRS. Um pressuposto do modelo é que ele possibilite melhorar a atual gestão de resíduos sólidos urbanos, reduzindo o volume dos rejeitos destinados aos aterros sanitários, através do reaproveitamento deles.

A próxima seção apresenta o alinhamento teórico entre a política nacional de resíduos sólidos e modelos de sistemas dinâmicos. A terceira seção apresenta a metodologia, para, em seguida, discorrer sobre a construção do modelo na quarta seção. A última seção apresenta as conclusões.

Política pública de gestão de resíduos à luz dos sistemas dinâmicos

A política pública que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº. 12.305/2010) passou 21 anos tramitando e sendo discutida com a participação de órgãos públicos, representantes dos setores privados, movimentos sociais e da sociedade civil. Ainda assim apresenta resultados abaixo do esperado (BENSEN, JACOBI, SILVA, 2021; FUGII; BOLSON; SILVA, 2018). Após a aprovação na Câmara dos Deputados, em 11 de março de 2010, e no senado federal, em 7 de julho de 2010, o Presidente da República Luís Inácio Lula da Silva sancionou a Lei Federal nº. 12.305/2010 (FUGII; BOLSON; SILVA, 2018).

De modo geral, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é composta por quatro títulos, compreendendo mais de dez capítulos são: objeto e campo de aplicação, definições, disposições gerais, princípios e objetivos, instrumentos, disposições preliminares, planos de resíduos sólidos, responsabilidade dos geradores e do poder público, resíduos perigosos, instrumentos econômico, proibições e disposições transitórias e finais (BRASIL, 2010).

De acordo com o Artigo 4º da PNRS, a Lei agrupa o conjunto de objetivos, princípios, instrumentos, metas, diretrizes e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010a).

No Artigo 6º da PNRS, estão relacionados os princípios da PNRS e envolve dentre outros aspectos o princípio poluidor-pagador e protetor-recebedor, o desenvolvimento sustentável e o “reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor

social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania” (BRASIL, 2010a – Art. 6^a. Princípio VIII). Estes princípios demonstram a amplitude da discussão e que a gestão de resíduos envolve uma interação e integração com o território e o desenvolvimento sustentável, que se tornam fundamentais em discussão e alinhado com as políticas nacionais, como em Lopes (2016).

Já o Artigo 7^o da Lei n^o. 12.305/2010 descreve os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos em que se ocupa com questões relevantes e integradas, como a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental e a (pre)ocupação com os princípios da economia circular, quais sejam: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Objetivo II). Além disso, os demais objetivos integram temas como capacitação, padrões sustentáveis, incentivo a indústria, articulação das diferentes esferas públicas e gestão integrada como alinhadas a um modelo complexo e muito dinâmico (BENSEN, JACOBI, SILVA, 2021).

O Artigo 8^o apresenta os instrumentos da PNRS, sendo que o inciso VII, menciona a pesquisa científica e tecnológica, o que está relacionado com esta pesquisa. A complexidade destes objetivos, princípios e instrumentos se relaciona aos diversos fluxos e atores envolvidos. Neste sentido, cabe compreendê-los como um processo de sistema dinâmico.

De acordo com Aracil (1983), a tomada de decisão é feita a partir de várias alternativas possíveis. Desta maneira, a relação que liga as possíveis ações com seus efeitos é precisamente, um modelo de sistema. Um modelo constitui uma representação abstrata de um certo aspecto da realidade e possui uma estrutura formada por elementos que caracterizam o aspecto da realidade modelada e as relações entre os elementos que compõem o modelo (ARACIL, 1983).

Para Forrester (2013), um modelo deve ser capaz de alcançar vários objetivos e deve abranger as seguintes características: descrever qualquer declaração da relação causa e efeito que se deseja incluir; Ser simples na natureza matemática; Sinônimo em nomenclatura para terminologia industrial, econômica e social; Concedido a um grande número de variáveis, sem exceder os limites práticos e; Capaz de lidar com interações contínuas, no sentido de quaisquer descontinuidades artificiais introduzidas por intervalos de tempo. Deve, contudo, ser capaz de gerar descontínuas mudanças na decisão quando esta for necessária (FORRESTER, 2013).

Para García (2004), a dinâmica de sistemas encontra suas principais aplicações em ambientes complexos e mal definidos, em que as decisões dos seres humanos são guiadas pela lógica. As

tendências recentes na dinâmica de sistema visam mudar os modelos mentais que as pessoas usam para representar o mundo real. Para tanto, é necessário que uma pessoa esteja suficientemente envolvida no processo de modelagem, para internalizar lições sobre comportamento de *feedback* dinâmico (FORRESTER, 1995).

De acordo com Churchman (2015), os sistemas são compostos por conjuntos de componentes que atuam na execução do objetivo. Von Bertalanffy (2015), define um sistema como um complexo de elementos em interação. De acordo com Bardach (2006), a estrutura de um sistema consiste em: (1) seus elementos constitutivos, (2) as regras de suas interações, e (3) as informações exigidas pelo sistema para aplicar as regras.

A análise de um sistema é a sua dissecação, pelo menos, conceitualmente, para definir as partes que o formam. No entanto, a mera análise de um sistema não é suficiente. Para entender seu comportamento, é necessário saber como as partes (variáveis) se encaixam; quais as relações entre as variáveis e como se desenvolvem ao longo do tempo (ARACIL, 1995).

O estudo de um sistema, passa por sua análise e síntese. A análise, permite conhecer as partes de um sistema, a síntese fornece a integração dessas partes dentro do sistema (ARACIL, 1995). A dinâmica de sistemas trata de expressar como estão relacionados sua estrutura e o seu comportamento.

A dinâmica de sistemas é projetada especialmente para lidar com interações lineares e não-lineares, sistemas de grande escala, complexos e dinâmicos. Ela possui a capacidade de lidar com suposições de configuração do sistema e estruturas dinâmicas, facilitando o controle dos efeitos das mudanças nos subsistemas e inter-relações de elementos no sistema holístico (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016).

Para construir um modelo de dinâmica do sistema, deve-se identificar um problema e desenvolver uma hipótese dinâmica explicando a causa do problema. A simulação é executada em um modelo de dinâmica do sistema, com o deslocamento do tempo (DYSON; CHANG, 2005). A análise de simulação ao longo do tempo, possibilita uma série de etapas de simulação ao longo prazo para atualizar o status das variáveis do sistema de interesse, gerando resultados das atividades do sistema (DYSON; CHANG, 2005). Um estudo de dinâmica de sistemas pode se desenvolver em distintos passos, apresentados no quadro 1.

Quadro 1 - Passos para o estudo com dinâmica de sistemas

Passos	Características
Passo 1	Observar os modos de comportamento do sistema real para tratar de identificar os elementos fundamentais do mesmo
Passo 2	Buscar as estruturas de realimentação que podem produzir o comportamento observado
Passo 3	Construção de um modelo matemático do comportamento do sistema de forma idónea.
Passo 4	Simulação
Passo 5	A estrutura se modifica até que seus componentes e o comportamento resultante coincidam com o comportamento observado
Passo 6	Modificação das decisões que podem ser introduzidas no modelo de simulação até encontrar decisões aceitáveis e úteis, que dão lugar a um comportamento real melhorado

Fonte: Aracil (1983).

Os estoques e fluxos, ao longo dos *loops* de realimentação, são dois conceitos centrais da teoria de dinâmica de sistemas (GEORGIADIS, 2013). Outros elementos são: as flechas (sentido), as variáveis complementares e a fonte externa (ARACIL, 1995). Uma melhor definição dos elementos é apresentada no quadro 2.

Quadro 2 - Os elementos básicos utilizados nos modelos de dinâmica de sistemas.

Elementos	Descrição
Variáveis (círculos)	Representam parâmetros que são usados no sistema
Variáveis constante (losango)	Variável que assume um valor que não varia
Fluxos	Representam o transporte de recursos
ESTOQUES (retângulos)	Representam acumulações/ não acumulações de algum recurso
Informação (canal)	Ligam os elementos do sistema e explicitam relações entre os mesmos. É importante observar que as informações, diferentemente dos fluxos, não retiram ou colocam recursos nos estoques. As informações também podem ter um "traço duplo", significando que as mesmas só estarão disponíveis num instante de tempo futuro e não imediatamente.
Fonte externa (nuvens)	Representa alguma fonte de recurso que está fora do escopo de interesse do modelo em estudo. Isto é, no exemplo acima, o fluxo retira recursos da fonte externa e joga no estoque. Os detalhes da fonte externa não são considerados no estudo do sistema representado pelo modelo.

Fonte: Villela (2005).

Um modelo pode apresentar o impacto e as consequências de relações causais não reconhecidas, atrasos estruturais e a complexidade dinâmica que poderiam levar a resultados menos intuitivos e informados para melhorar a situação (FAN *et al.*, 2018). Sterman (2000) apresenta cinco passos para o processo de modelagem, descritos no quadro 3.

Quadro 3 - Passos para o processo de modelagem

Passo	Nome	Questionamentos/ Ação
1	Articulação de Problemas (Seleção de Limites)	<p>Seleção de tema: Qual é o problema? Por que isso é um problema?</p> <p>Principais variáveis: Quais são as principais variáveis e conceitos?</p> <p>Horizonte de tempo: Até que ponto no futuro devemos considerar? Quão longe no passado estão as raízes do problema?</p> <p>Definição dinâmica de problemas (modos de referência): Qual é o comportamento dos conceitos-chave e das variáveis? Como será o seu comportamento no futuro?</p>
2	Formulação de Hipóteses Dinâmicas	<p>Geração de hipóteses iniciais: Quais são as teorias atuais do comportamento problemático?</p> <p>Foco endógeno: Formular uma hipótese dinâmica que explique a dinâmica como consequências endógenas da estrutura de feedback.</p> <p>Mapeamento: Desenvolver mapas de estrutura causal com base em hipóteses iniciais, variáveis-chave, modos de referência e outros dados disponíveis, usando ferramentas como: Diagramas de contorno do modelo; Diagramas do subsistema; Diagramas do circuito causal; Mapas de estoque e de fluxo; Diagramas de estrutura de políticas; Outros instrumentos de facilitação.</p>
3	Formulação de um modelo de simulação	<p>Especificação da estrutura, regras de decisão.</p> <p>Estimativa de parâmetros, relações comportamentais e condições iniciais.</p> <p>Testar a consistência com um propósito e um limite.</p>
4	Teste	<p>Comparação com os modos de referência: O modelo reproduz o comportamento do problema adequadamente para o seu propósito? Robustez sob condições extremas: O modelo se comporta realisticamente quando forçado por condições extremas?</p> <p>Sensibilidade: Como se comporta o modelo a incerteza de parâmetros, condições iniciais, limite do modelo e agregação?</p>
5	Planejamento e Avaliação de Políticas	<p>Especificação do cenário: Que condições ambientais podem surgir?</p>

		Projeto de política: quais novas regras de decisão, estratégias e estruturas podem ser julgadas no mundo real? Como eles podem ser representados no modelo? "E se. . ." Análise: Quais são os efeitos das políticas? Análise de sensibilidade: Quão robustas são as recomendações de políticas sob diferentes cenários e incertezas dadas? Interações de políticas: As políticas interagem? Existem sinergias ou respostas compensatórias?
--	--	--

Fonte: Sterman (2000).

A pesquisa buscou apresentar um modelo com as principais variáveis e a simulação destes, com a geração de gráficos que facilitem a comparação de diversos futuros, possibilitando alternativas. Podendo assim, auxiliar a tomada de decisão na gestão de resíduos sólidos urbanos e propondo novas políticas públicas.

Metodologia de pesquisa

A pesquisa se desenvolveu em 3 fases, sendo que este artigo se concentra nas duas últimas fases. A primeira refere-se a uma pesquisa exploratória e descritiva, que se utiliza da pesquisa bibliográfica para definição das variáveis. Esta etapa foi definida e publicada em Silva, Fugii e Santoyo (2017). A segunda fase é a explicativa e analítica porque desenvolve o modelo a partir dos 5 passos para modelagem, apresentados no Quadro 3, a partir dos preceitos de sistemas dinâmicos (MATOS, 2012). A terceira fase é uma pesquisa explicativa e analítica que se utiliza do modelo construído na fase 2 para estabelecer cenários e a modelagem (Quadro 4).

Trata-se de uma pesquisa qualitativa na primeira fase com coleta de dados por meio de revisão de literatura. A segunda fase e terceira fases são qualitativas, com uso de técnicas quantitativas de estabelecimento de um modelo de sistemas dinâmicos, com análises experimentais.

Trata-se de uma pesquisa documental e experimental, com estudo de caso, quanto aos procedimentos metodológicos. A primeira fase se refere ao procedimento documental e o estudo de caso e experimental a segunda e terceira fases. Quanto a abordagem é quali-quantitativa porque definem as variáveis por meio da pesquisa bibliométrica e documental (fase 1) e quantitativa por utilizar a análise de dados para estabelecimento dos cenários. A natureza desta pesquisa é aplicada porque objetiva gerar novos conhecimentos para solucionar problemas específicos.

A pesquisa seguiu os cinco passos para o estabelecimento de um modelo de sistema dinâmico propostos por Sterman (2000), identificados no Quadro 3. Apresenta-se a seguir a explicação de cada passo para o caso em estudo.

Primeiro passo: o problema está relacionado a atual gestão praticada no Brasil e as deficiências encontradas em Curitiba nas pesquisas passadas. Desta forma, o trabalho propôs um modelo de gestão de resíduos sólidos urbanos aplicado ao município, possuindo como base a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a teoria de Economia Circular.

A atual investigação é o desdobramento da primeira fase, publicada em Silva, Fugii e Santoyo (2017), as quais forneceram as variáveis para o desenvolvimento do modelo apresentado.

Segundo passo: está relacionado ao objetivo geral da pesquisa, que foi apresentar um modelo de gestão de resíduos sólidos urbanos, baseado em dinâmica de sistemas para antecipar o futuro, gerando cenários e auxiliar na tomada de decisão. A partir das variáveis estipuladas no primeiro passo e das relações existentes entre as variáveis, pressupostos na teoria, foi contruído o modelo teórico.

Terceiro e quarto passo são respectivamente a formulação de um modelo de simulação e o teste que utilizaram o programa de computador Vensim® Software. A partir do modelo teórico se desenvolveu o sistema dinâmico para a simulação. Nesta fase, o teste do modelo foi realizado e validado por meio de entrevistas com especialistas para a atualização do atual cenário de Curitiba, bem como fornecer os dados primários necessários para desenvolver o sistema.

A obtenção dos dados primários contou com a participação de indivíduos ligados direta ou indiretamente à gestão de resíduos de Curitiba, ou seja, pessoas da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, Instituto Lixo e Cidadania e Secretaria Municipal de Abastecimento.

Entre as respostas primárias obtidas para execução dos cenários estão o custo atual de coleta, o custo de disposição final, quantidade per capita gerada de resíduos, composição gravimétrica do resíduo gerado, destino final, tratamentos existentes, ações futuras e o horizonte de análise, que é o tempo de duração do próximo serviço licitado.

Além dos dados primários a pesquisa contou com a complementação de dados secundários oficiais provenientes do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – (SNIS), Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Curitiba de 2017, Plano de Gerenciamento do Tratamento

e Destinação de Resíduos Sólidos Urbanos do Consórcio Intermunicipal para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos, além do portal eletrônico da prefeitura de Curitiba.

Tais fontes forneceram o número de habitantes, a taxa de crescimento populacional, estratégias passadas, ações futuras e dados históricos da gestão desde 2010. A partir dos dados e das variáveis foi construído um modelo baseado na metodologia de Dinâmica de Sistemas.

Desta forma os cenários gerados possuem uma maior circularidade de materiais através da reciclagem de matéria seca e úmida, redução da quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário, responsabilidade compartilhada pelos resíduos, tecnologias alternativas de tratamento, um melhor acondicionamento e segregação, além de evitar a geração de resíduos.

Quinto passo: planejamento e avaliação de políticas, que foram discutidos a partir dos resultados obtidos da aplicação do modelo simulando o município de Curitiba. Tal simulação foi feita para um horizonte de 27 anos que corresponde a duração do próximo serviço licitado. O primeiro cenário apresentou um desdobramento da atual conjuntura do sistema de gestão de resíduos até o ano de 2045, ou seja, segue com os problemas e as limitações presentes e gera as consequências futuras, como será apresentado na seção dos resultados.

O quadro 4 apresenta a estrutura da pesquisa com as suas principais atividades desenvolvidas referente a metodologia.

Quadro 4 - Estrutura da metodologia da pesquisa

Pesquisa	Técnica/ Atividade	Materiais	Tema	ETAPA	Atores-Objeto de pesquisa
Fase exploratória/ descritiva	Pesquisa bibliográfica/ Revisão da literatura	Livros, artigos, teses, dissertações	Gestão de resíduos sólidos urbanos	Passo 1 – Quadro 3	Economopoulos (2012); Jacobi e Besen (2011); Lohri <i>et al.</i> , (2017); Massukado (2008); Monteiro <i>et al.</i> , (2001); Othman <i>et al.</i> (2012); Tchobanoglous e Kreith (2002); Zanta e Ferreira (2003). SNIS (2021); Leis; Dyson e Chang (2005); Georgiadis (2013); Kolekar, Hazra e Chakrabarty (2016); Simonetto e Löblerb (2014); Sukholthaman e Sharp (2016)

		Livros, artigos, teses, dissertações	Políticas públicas		Dye (2011); Kraft e Furlong (2010); Souza (2006); Trevisan e Van Bellen (2008)
		Artigos, livros, teses	Dinâmica de sistemas		Aracil (1995); Dyson e Chang (2005); Forrester (1971); Simonetto e Löblerb (2014); Sterman (2000)
Fase explicativa/analítica	Dinâmica de sistemas/ Construção de modelos	Portfólio com os principais trabalhos, livros, teses	Metodologia de dinâmica de sistemas	Passo 2 a 5 – Quadro 3	Matos (2012); Simonetto e Löblerb (2014); Sterman (2000)
Fase explicativa/analítica	Dinâmica de sistemas/ Modelagem e simulação	<u>Vensim®</u> <u>Software</u>	Aplicação da dinâmica de sistemas	Passo 5 – Quadro 3	Garcia (2003, 2008); Simonetto e Löblerb (2014); Sterman (2000)

Fonte: Autoria própria (2022).

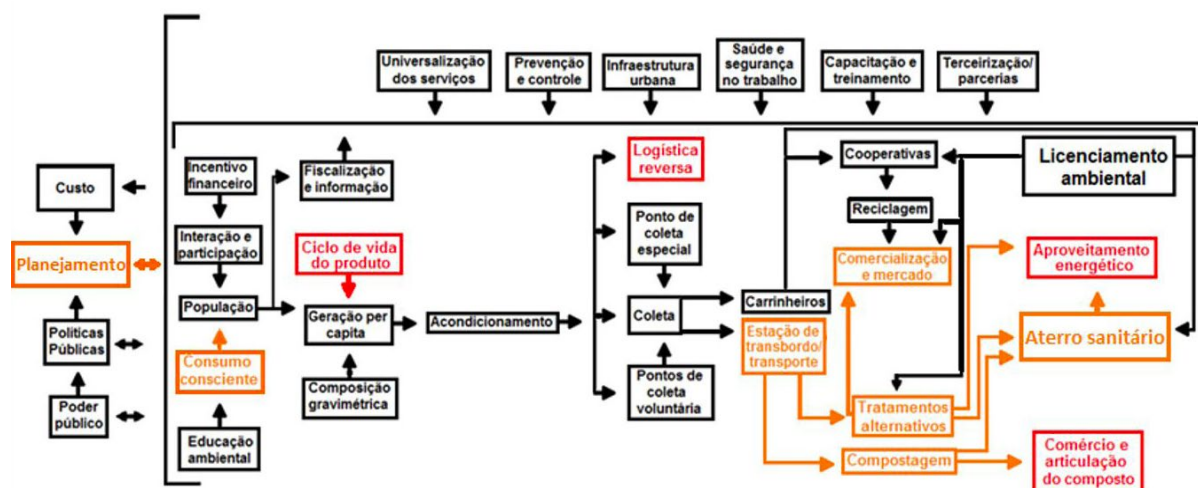
Resultados: construção do modelo e simulação

As variáveis utilizadas no modelo são procedentes da pesquisa de Silva, Fugii e Santoyo (2017) que avaliaram as ações do poder público municipal de Curitiba diante das políticas de gestão de resíduos sólidos urbanos, para o contexto brasileiro. Entre os resultados obtidos, os autores destacam que o município possui uma universalização do serviço e presta os serviços básicos de coleta seletiva e disposição final em aterro sanitário. Entretanto, chamam atenção para necessidade de melhoria da gestão, considerando que o município não possui um tratamento para os resíduos úmidos, além de possuir uma baixa taxa de reciclagem dos resíduos secos (SILVA; FUGII; SANTOYO, 2017).

Existe a necessidade de novas pesquisas que avaliem a real situação dos serviços prestados *in situ* para o avanço da gestão no município. As variáveis utilizadas em outros trabalhos destes pesquisadores, foram estabelecidas por meio de uma avaliação por especialistas, com o uso de um questionário, cuja as respostas passaram por um teste de confiabilidade. Esse resultado está apresentado em Silva, Fugii e Santoyo (2017), que estruturou um modelo teórico de avaliação da

política municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (GIRSU) aplicado ao município de Curitiba (Figura 1).

Figura 1 - Modelo de avaliação da política municipal de GIRSU aplicado à Curitiba



Fonte: Silva, Fugii e Santoyo (2017).

As variáveis em preto são aquelas alinhadas com a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A cor laranja significa que há algumas ações sendo realizadas, atendendo parcialmente a PNRS, e a cor vermelha expressa as variáveis não alinhadas com a Lei Federal n. 12.305/2010. O atual modelo aplicado em Curitiba possui duas formas de coleta de resíduos: a úmida compostável com rejeitos e a seca. A via úmida é mesclada de rejeitos, material seco e úmidos compostáveis, o que dificulta a possibilidade de tratamento (MASSUKADO, 2008) e é agravado pela falta de incentivos (HOORNWEG, THOMAS e OTTEN, 1999). Os resíduos úmidos e rejeitos com material seco representam hoje 95% do total gerado e são direcionados para os aterros sanitários sem nenhum tratamento.

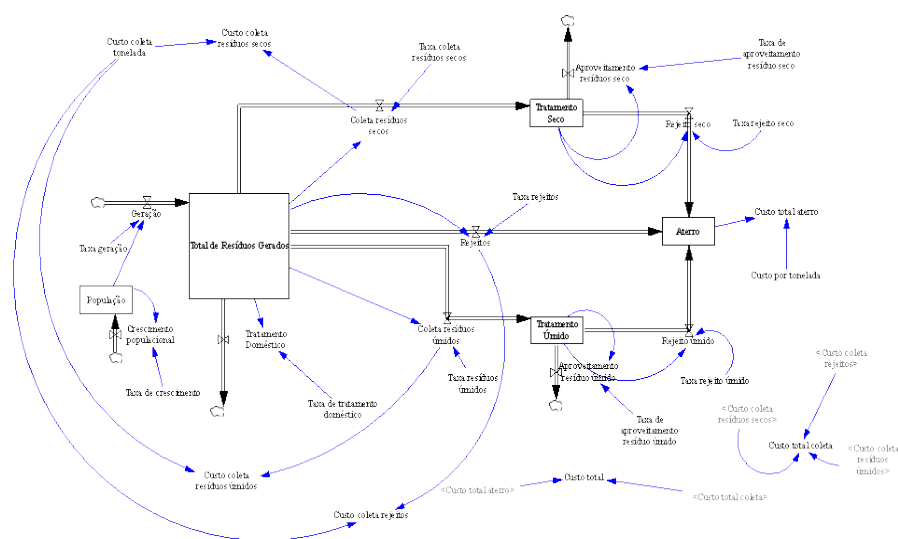
O sistema integrado proposto e publicado Silva, Fugii e Santoyo (2017) serve de base para o desenvolvimento e proposição de um novo modelo para a gestão de resíduos sólidos urbanos da capital paranaense: o modelo que busca alinhar as variáveis em laranja e vermelho, vistas na figura 1. Dentre as variáveis trabalhadas (diretamente ou indiretamente) no modelo estão: consumo consciente, planejamento, ciclo de vida do produto, logística reversa, tratamentos alternativos, compostagem, transporte, estação de transbordo e aterro sanitário.

O modelo foi construído com base na metodologia de Dinâmica de Sistemas, considerando as concepções acerca da economia circular, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os problemas encontrados nas pesquisas passadas e o cenário atual dos resíduos sólidos urbanos do município de Curitiba.

Os trabalhos de Garcia (2003), Garcia (2008), Kolekar, Hazra e Chakrabarty (2016), Dyson e Chang (2005), Babader et al. (2016), Guo et al. (2016), Liu et al. (2014), Sukholthaman e Sharp (2016), Georgiadis (2013), Karavezyris, Timpe e Marzi (2002), Elia, Gnoni e Tornese (2016), Tozan e Ompad (2015), Matos (2012), Fan et al. (2018), Sufian e Bala (2007), Dace et al. (2014), Long et al. (2012), Tsolakis e Anthopoulos (2015), Eriksson et al. (2005), Simonetto e Löblerb (2014) e Simonetto (2014) serviram tanto para o desenvolvimento do sistema quanto para sua aplicação.

O modelo é a base para desenvolver os cenários futuros para um horizonte de 27 anos, possibilitando demonstrar o panorama da gestão a médio e longo prazo, antecipando problemas futuros, apresentando alternativas e auxiliando no planejamento estratégico de políticas públicas futuras e na tomada de decisão. O período de 27 anos foi estabelecido para se ter a perspectiva em 2050. A figura 2 apresenta o modelo de dinâmica de sistemas construído para a gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares. O êxito de tal sistema depende da sociedade, a qual é responsável pela segregação correta dos materiais. O modelo apresentado possui um tratamento descentralizado, que conta com um tratamento domiciliar/comunitário, seguido de um tratamento centralizado, com coleta de s resíduos em três formas: os úmidos compostáveis, secos e rejeitos.

Figura 2 - Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares baseado em Dinâmica de Sistemas



Fonte: Autoria própria.

O modelo utiliza o tratamento dos resíduos úmidos compostáveis de forma descentralizada, seja a nível doméstico ou comunitário. Tal iniciativa representa uma redução dupla, ou seja, no custo de coleta que é de R\$ 177,97 (cento e dezessete reais e noventa e sete centavos) por tonelada e no custo do resíduo destinado ao aterro que é de R\$72,89 (setenta e dois reais, oitenta e nove centavos) por tonelada. Desta forma, detalha-se e justifica-se a seguir os fluxos deste modelo (Figura 2).

O sistema de compostagem ou vermicompostagem possui baixo custo de investimento e construção em relação aos outros métodos de tratamento, além de ser considerado limpo, sustentável e converter os resíduos em produtos com valor agregado (AMORIN *et al.*, 2016; DA SILVA *et al.*, 2018; DA Silva *et al.*, 2016; LIM; LEE; WU, 2016).

Desta forma, o modelo proposto evidencia que o tratamento dos resíduos pode contribuir para uma gestão de resíduos mais eficiente, devido a inexistência de um melhor sistema tecnológico de tratamento e coleta de resíduos, bem como um sistema de produção de materiais, mudança de hábitos que induzam à reciclagem (COSTA, 2010) e uma segregação e redução dos resíduos na fonte geradora.

Para o caso dos rejeitos que, de acordo com o estudo gravimétrico, representam cerca de 20% dos resíduos gerados, não foi simulado neste trabalho, o qual foca principalmente no tratamento dos resíduos orgânicos compostáveis. Algumas possibilidades para estes resíduos são sua substituição por materiais úmidos compostáveis ou secos, além do uso de outras tecnologias como as térmicas, que também não são abordadas no trabalho.

Entre os tratamentos que exigem calor está a incineração, a qual não é utilizada pelo município no tratamento dos resíduos sólidos urbanos domésticos e nem no modelo, devido ao elevado custo de investimento, manutenção, operação e monitoramento. Além da necessidade de mão-de-obra especializada e uso de combustíveis, o sistema pode gerar produtos tão ou mais perigosos quanto o próprio resíduo quando operado de forma incorreta (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011).

A incineração e outras formas de recuperação de energia, apesar de úteis na redução da quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários, impedem a reciclagem de materiais (TISSERANT *et al.*, 2017). Promover a indústria de recursos de reciclagem e de produtos pós-consumo, aumenta a vida útil do aterro sanitário e reduz a necessidade da incineração (JUN; XIANG, 2011).

Diversos autores abordaram a questão de modelos de reciclagem de resíduos sólidos Kolekar, Hazra e Chakrabarty (2016) discutiram e revisaram modelos de previsão de geração de resíduos, Dyson e Chang (2005) também trabalharam com a geração de resíduos. Babader *et al.* (2016) abordaram o comportamento social e o reuso de embalagens, Guo *et al.* (2016) trabalharam a intervenção para a mudança do comportamento em Baltimore, Estados Unidos e Liu *et al.* (2014) pesquisaram o consumo e o impacto.

Sukholthaman e Sharp (2016) trabalharam a segregação de resíduos em Bangkok, Tailândia. Georgiadis (2013) discutiu uma rede de reciclagem com o foco no papel da indústria e Karavezyris, Timpe e Marzi (2002) utilizaram duas ferramentas para a previsão da gestão de resíduos sólidos.

Elia, Gnoni e Tornese (2016) avaliaram a coleta de resíduos através do sistema de serviço de produtos e Tozan e Ompad (2015) trabalharam em questões relacionadas a saúde urbana. Já Matos (2012) trabalhou em redes de logística reversa, Fan *et al.* (2018) modelaram a reciclagem em Taiwan e Sufian e Bala (2007) retrataram a gestão de resíduos em Daca, Bangladesh. Dace *et al.* (2014) analisaram o efeito da política de desenvolvimento de embalagens e Long *et al.* (2012) trabalharam a geração de resíduo plástico em Pequim, China.

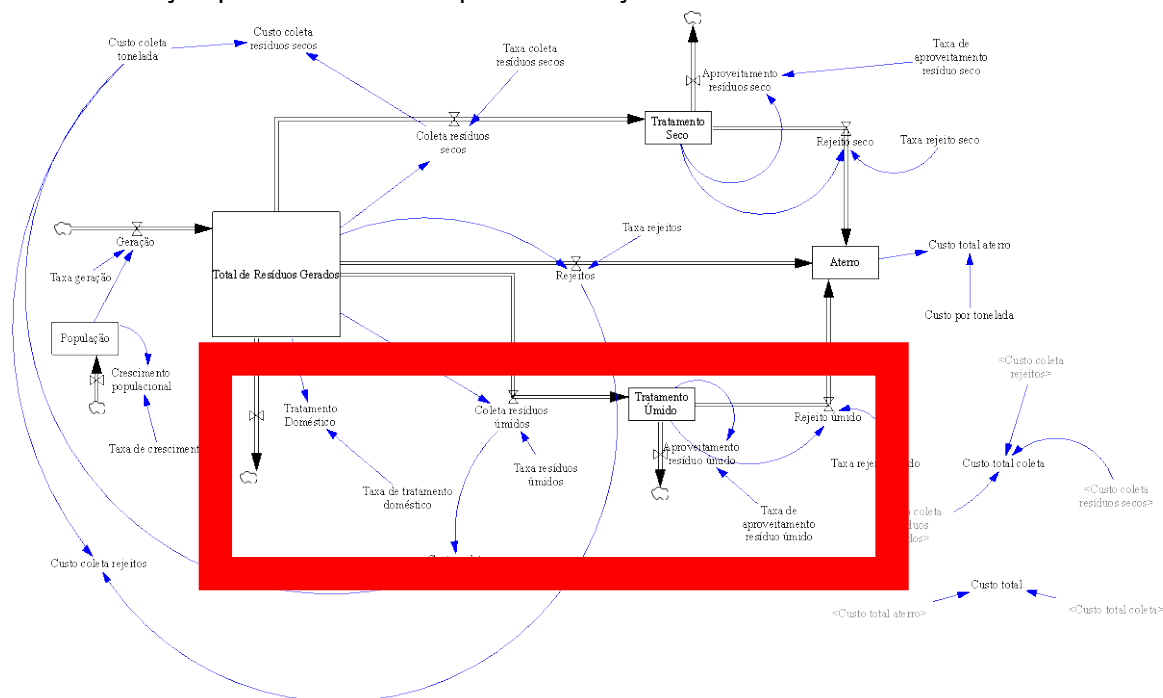
Tsolakis e Anthopoulos (2015) abordaram a questão de cidades inteligentes e o desenvolvimento, já Eriksson *et al.* (2005) exploraram a avaliação do ciclo de vida dos produtos. Simonetto e Löblerb (2014) avaliaram cenário para geração e a disposição de resíduos sólidos urbanos e Simonetto (2014) analisou cenários para o resíduo sólido. Silva, Weins e Potinkara (2019) discutem a questão das relações formais e informais na cadeia de resíduos nos países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) e Silva (2018) apresenta um modelo com enfoque em Curitiba, mas centrado na reciclagem.

Assim, o modelo apresentado difere em alguns aspectos dos outros modelos por propor uma descentralização da compostagem, participação da sociedade, a segregação de resíduos em três tipos, a exclusão da incineração. O modelo ainda considera as características do município de Curitiba, buscando seguir os preceitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil e as concepções da Economia Circular.

Validação do modelo

Para validação do modelo, simulou-se a partir dos dados atuais foram utilizadas apenas as variáveis que estão fora da caixa em vermelho, como demonstra a figura 3. Desta forma, o panorama previu o desdobramento do atual serviço fornecido em um horizonte de 27 anos.

Figura 3 - Utilização parcial do modelo pra a simulação do atua cenário



Fonte: Autoria própria.

Os dados para a simulação do panorama atual estão presentes no quadro 5, extraídos das entrevistas, Planos Municipais e dados históricos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. É a base para os outros cenários, mudando apenas as taxas de tratamento e reaproveitamento e o ano das mudanças. Desta maneira é possível aplicá-lo a outros municípios.

Quadro 5 - Dados utilizados para a simulação do modelo

População	1.917.185	Taxa de reciclagem de resíduo seco	0.05%
Taxa de crescimento populacional	0,99	Taxa de reaproveitamento de resíduo seco (Sobre o percentual dos resíduos secos)	0.055%
Geração per capita	0,8 Kg	Taxa de rejeito	0.95%

Taxa de compostagem descentralizada	0%	Custo de coleta e transporte	177,97 por tonelada
Taxa de tratamento úmido centralizado	0%	Custo aterramento	72,89 por tonelada

Fonte: Autoria própria.

O gráfico 1 apresenta os custos do atual modelo até 2045. Caso o serviço prestado seja mantido, o custo total em um horizonte de 27 anos será de R\$ 4.327.274.227, com custos crescentes ao passar dos anos, sem considerar inflações futuras.

No ano de 2045, há uma projeção para uma população, para Curitiba, de 2.501.381 de habitantes com um gasto de R\$ 181.631.730,2. Para validar este valor simulado comparou-se com outros municípios com população atual próxima ao projetado para Curitiba no final do cenário (2045). Assim, a partir de dados do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS, 2021), as capitais mais próximas seriam Fortaleza, Belo Horizonte (Quadro 6). Neste quadro pode-se observar que a tendência dos custos e da quantidade de resíduos dispostos no aterro sanitário variam pouco entre os três municípios, recordando que Curitiba seja o valor projetado e Fortaleza e Belo Horizonte os valores reais para validação dos resultados encontrados.

O mesmo acontece com os valores unitários (disposição per capita por dia e custo por disposição por tonelada) que indicam uma variação entre o cenário projetado para Curitiba próximo aos valores atuais de Fortaleza e Belo Horizonte.

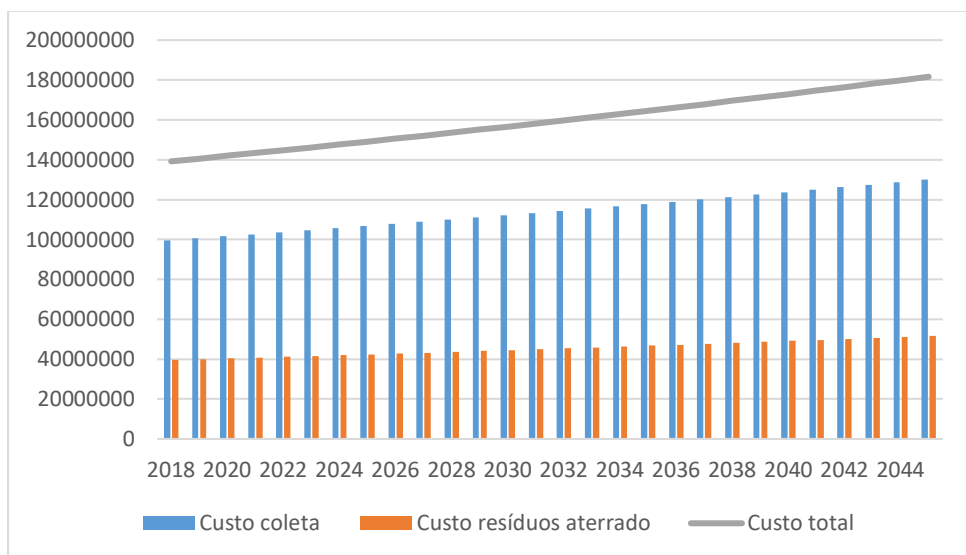
Quadro 6 – Comparação dos Resultado da Política de Gestão de Resíduos de Curitiba (Projetado em 2045) com dados Atuais de Fortaleza e Belo Horizonte

Cidade (Brasil)	Ano	População	Custo do Serviço (Milhões R\$/Ano)	Quantidade de Resíduos Disposto no Aterro Sanitário (TON/ Ano)	Disposição per capita (kg/ dia)	Custo Disposição (R\$/ TON)
Curitiba	2045 (Projetado pelo Modelo)	2.501.381	182	730.403	0,80	249,18
Fortaleza	2013	2.551.806	196	857.161	0,92	228,66
Belo Horizonte	2015	2.502.557	135	822.064	0,90	164,22

Fonte: Autoria própria.

A partir desta validação do modelo, o gráfico 1 demonstra a evolução do custo do serviço ao longo do tempo projetado para Curitiba, dividindo entre custo de coleta e da disposição, bem como custo total.

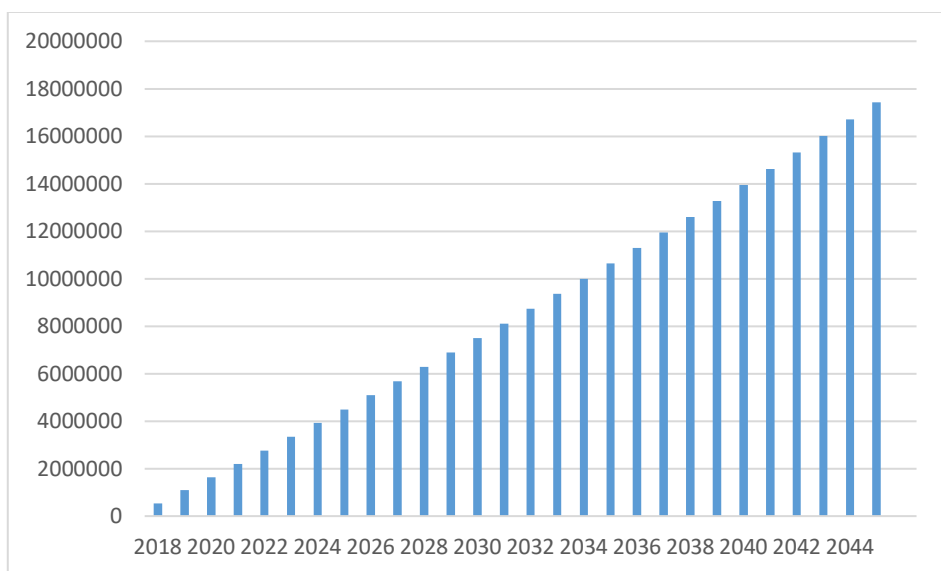
Gráfico 1 – Aplicação do Modelo Dinâmico de Gestão de Resíduos para Projetar os Custos dos serviços em um horizonte de 27 anos – Curitiba



Fonte: Autoria própria.

O gráfico 2 apresenta a quantidade crescente de resíduos destinados ao aterro com um total de 16.879.392 de toneladas de resíduos acumulados em 27 anos, recebendo um total de 708.491 toneladas em 2045 por ano.

Gráfico 1- Quantidade de resíduos destinados ao aterro no modelo atual



Fonte: Autoria própria.

A prefeitura possui, desde 2010, um Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos que é revisto a cada novo mandato. Esse Plano conta com ações e estratégias para reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários por meio da compostagem, do aumento do reaproveitamento dos resíduos secos e de cooperativas de reciclagem.

Entretanto, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, que traz dados históricos repassados pela prefeitura, demonstra que Curitiba destina mais de 96% do que é gerado para o aterro sanitário (SNIS, 2021).

Diante disso, a aplicação do modelo pode permitir a elaborar cenários de ações de política pública que relacione o custo e o benefício de cada ação. Como exemplo, pode-se citar alguns cenários possíveis: a análise da redução do custo de coleta e transporte utilizando uma estação de transbordo; tratamento de resíduos secos com um viés de economia circular e redução de resíduos destinados ao aterro sanitário; tratamento descentralizado dos resíduos orgânicos compostáveis realizados com a participação da sociedade em suas residências ou em áreas comunitárias; tendência de gestões de outros países, com 50% dos resíduos úmidos tradas de forma descentralizada (20% do total de resíduos) e 5% do reaproveitamento dos resíduos secos; dentre outros cenários.

Conclusão

A proposição do modelo considerou a metodologia de Dinâmica de Sistemas, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e as possibilidades de destinação a partir do contexto brasileiro. As entrevistas e as pesquisas bibliográficas e documentais forneceram dados atuais para a aplicação do modelo construído e para proposição de cenários. O modelo apresentado na figura 2, fornece uma base para cenários futuros, considerando os valores mais atuais, ou seja, projeta o futuro de acordo com o atual modelo praticado,

Os cenários desenvolvidos servem para auxiliar no planejamento, na tomada de decisão e na implantação de políticas públicas. O modelo proposto contribui para projetar a médio e longo prazo, a quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário e os custos de uma determinada gestão, bem como as relações das variáveis que compõem o sistema dinâmico.

Tal modelo pode ser aplicado a outros municípios, auxiliando o planejamento estratégico, a tomada de decisão e a implementação de políticas públicas. Por meio dos cenários, é possível ter

uma ideia das consequências futuras e como proceder para atingir um determinado objetivo, seja ele financeiro (redução do custo da gestão de resíduos), ou de redução de materiais destinados ao aterro sanitário ou ambos (volumes financeiros e físicos). Demonstra também que, apenas a intenção não é capaz de mudar uma realidade. O Plano Municipal faz menção às alternativas desenvolvidas no modelo, falta, porém, uma maior reivindicação, participação e avaliação da sociedade nos processos de políticas públicas que envolve a cadeia de resíduos sólidos urbanos domiciliares.

A validação do modelo permite utilizá-lo para realizar vários cenários e apoiar o processo de tomada de decisão dos gestores públicos envolvidos, bem como incentivar a maior participação social neste processo. Há alternativas públicas para este problema que é crescente em vários países em desenvolvimento, como o Brasil, mas também há oportunidade de transformar esses problemas em alternativas para o melhor uso dos recursos naturais. A crise gera oportunidades e isso não é diferente quando se trata de resíduos sólidos, mas é necessário compreender este problema sobre outro prisma, como se propõe neste artigo. Sugere-se a aplicação deste modelo com a análise de cenários para Curitiba, bem como a utilização da sua fundamentação para aplicação para outros municípios.

Por fim, ressalta-se que o modelo permite criar novas formas de gestão dos resíduos nos municípios brasileiros, considerando ser um dos principais itens de gasto públicos municipais e a necessidade de atendimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa nova forma de compreender a gestão de resíduos torna o problema, como posto atualmente, em oportunidade para o desenvolvimento regional.

Desta forma, é importante entender a questão da política pública de resíduos sólidos como uma oportunidade. O modelo possibilita estabelecer cenários, que se utilizam das premissas da economia circular, e pode mostrar que a longo prazo essa política será melhor tanto socioeconômica, ambiental e institucional que o modelo atual de gestão de resíduos.

O uso do modelo para gestão de resíduos é socioeconomicamente melhor por gerar renda para as organizações cooperativas, bem com reduzir o custo de “enterrar” o resíduos e gerar mais recursos públicas para que as prefeituras possa investir em outras funções sociais. Além disso, é ambientalmente melhor por diminuir o impacto e atender as premissas de mitigação da Política

Nacional do Meio Ambiente. Não menos importante, é melhor sob a ótica institucional por cumprir as premissas da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Agradecimentos: a CAPES por bolsa auxílio e ao CNPq pelo auxílio à pesquisa (Processo 306960/2019-2 e 304937/2022-3).

Referências

- AMORIN, V. F. *et al.* (2016). Vermicompostagem doméstica como alternativa na decomposição de resíduos orgânicos. In: 10º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, Porto Alegre. **Anais [...]** Disponível em: http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/arqTrabalhos/trab_20160929194143000000987.pdf. Acesso em: 19 fev. 2019.
- ARACIL, J. (1995). **Dinâmica de Sistemas**. 1. ed. Madrid: Isdefe.
- ARACIL, J. (1983). **Introducción a la dinámica de sistemas**. 1 ed. Madrid: Alianza Editorial.
- ARAÚJO, C. A. A. (2006). Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em questão**, v. 12, n. 1, p. 11-32.
- BABADER, A. *et al.* (2016). A system dynamics approach for enhancing social behaviours regarding the reuse of packaging. **Expert Systems with Applications**, v. 46, p. 417-425.
- BARDACH, E. (2006). Policy Dynamics. In MORAN, Michel; REIN Martin; GOODIN, Robert E. **The Oxford Handbook of Public Policy**. Oxford: Oxford, p. 336-366.
- BAUMAN, Z. (2008). **Vida para o consumo: a transformação das pessoas em mercadorias**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar.
- BESEN, G. R.; JACOBI, P. R.; SILVA, C. L. (Org.) (2021). 10 anos da Política de Resíduos Sólidos: caminhos e agendas para um futuro sustentável. 1. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo. Instituto de Energia e Ambiente.
- BRASIL. Decreto-Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. 03 ago. 2010.
- CHURCHMAN, C. W. 2. ed. (2015). **Introdução à teoria dos sistemas**. Petrópolis: Vozes.
- COSTA, J. P. F. da. (2010). **Tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos: avaliação do seu potencial para a recuperação de materiais recicláveis**. Dissertação (Mestrado em Ecologia Humana e Problemas Sociais Contemporâneos) - Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, p. 92.
- DA SILVA, K. L. *et al.* (2018). Minhocário de Baixo Custo Uma Alternativa Viável para o Reaproveitamento de Resíduos Orgânicos Domésticos. **Revista da META**, v.1, n.1, p.386 – 392.
- DA SILVA, S. S. *et al.* (2016). Fabricação de composteira artesanal para produção de adubo orgânico na Escola Municipal Maria José de Albuquerque, Arara,PB. **Revista Scire**,v.9, n. 1, p. 1-11.
- DACE, E. *et al.* (2014). System dynamics model for analyzing effects of eco-design policy on packaging waste management system. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 175-190.
- DYE, T. R. (2011). **Understanding public policy**. 13 ed. New Jersey: Pearson Education, 2011.

- DYSON, B.; CHANG, N. (2005). 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.
- ECONOMOPOULOS, A. P. (2012). Planning Tools and Procedures for Rational Municipal Solid Wastes Management. In: KARAGIANNIDIS, Avraam K. **Waste to Energy: opportunities and challenges for developing and transition economies**. London: Springer.
- ELIA, V.; GNONI, M.; TORNESE, F. (2016). Assessing the Efficiency of a PSS Solution for Waste Collection: A Simulation Based Approach. **Procedia CIRP**, v. 47, p. 252-257.
- ERIKSSON, O. *et al.* (2005). Municipal solid waste management from a systems perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 3, p. 241-252.
- FAN, C. *et al.* (2018). Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 167-175.
- FORRESTER, J. W. (1971). Counterintuitive behavior of social systems. **Theory and Decision**, v. 2, n. 2, p. 109-140.
- FORRESTER, J. W. (1961). **Industrial Dynamics**. Cambridge: Mit Press.
- FORRESTER, J. W. (2013). **Industrial dynamics**. 1 ed. Massachusetts: Martino Publishing.
- FORRESTER, J. W. (1995). The beginning of system dynamics. **McKinsey Quarterly**, p. 4-17.
- FUGII, G. M.; BOLSON, C. R.; SILVA, C. L. da. (2018). Sociedad o suciedad. *In: VII JORNADAS LATINOAMERICANAS DE ESTUDIOS SOCIALES DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA, 2018, Santiago Anais [...]*.
- GARCÍA, J. M. (2004). **Dinámica de Sistemas**. Conceptos. Barcelona: Ed. do Autor.
- GARCÍA, J. M. (2008). **Ejercicios avanzados en Dinámica de Sistemas**. Barcelona: Ed. do autor.
- GARCÍA, J. M. (2003). **Teoría e ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas**. Barcelona: Ed. do autor.
- GEORGIADIS, P. (2013). An integrated system dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 32, p. 116-137.
- GUERRERO, L. A.; MAAS, G.; HOGLAND, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste management**, v. 33, n. 1, p. 220-232.
- GUO, H. *et al.* (2016). System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study. **Waste Management**, v. 56, p. 547-560.
- HOORNWEG, D.; THOMAS, L.; OTTEN, L. (1999). Composting and its applicability in developing countries. **World Bank working paper series**, v. 8, p. 1-41.
- HORKHEIMER, M.; ADORNO; T. W. (1991). **Dialética do esclarecimento: fragmentos filosóficos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991.
- LOPES, Alberto (coord). **Políticas públicas para cidades sustentáveis: integração intersetorial, federativa e territorial**. Rio de Janeiro: IBAM, MCTIC, 2016.
- JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estud. av.**, São Paulo, v. 25, n. 71, abr.
- JUN, H.; XIANG, H. (2011). Development of circular economy is a fundamental way to achieve agriculture sustainable development in China. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1530-1534.

- KARAVEZYRIS, V.; TIMPE, K.; MARZI, R. (2002). Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. **Mathematics and Computers in simulation**, v. 60, n. 3, p. 149-158.
- KOLEKAR, K. A.; HAZRA, T.; CHAKRABARTY, S. N. A (2016). Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 238-244.
- KRAFT, M. E.; FURLONG, S. R. (2010). **Public Policy: politics, analysis and alternatives**. 3ed. Washington: CQ Press.
- LIM, S. L.; LEE, L. H.; WU, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 111, p. 262-278.
- LOHRI, C. R. *et al.* (2017). Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low-and middle-income settings. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 16, n. 1, p. 81-130.
- LONG, F. *et al.* (2012). Scenarios simulation on municipal plastic waste generation of different functional areas of Beijing. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 14, n. 3, p. 250-258.
- MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. (2011). Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 173-187, abr./jun.
- MASSUKADO, L. M. (2008). **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 182.
- MATOS, D. A. de (2012). **Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da dinâmica de sistemas**. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 195.
- MATTOS, J. C. P. (2006). **Poluição ambiental por resíduos sólidos em ecossistemas urbanos**: estudo de caso do aterro controlado de Rio Branco - AC. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) - Departamento de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Acre. Rio Branco, p. 104.
- MONTEIRO, J. H. P. *et al.* (2001). **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2012.
- OTHMAN, S. N. *et al.* (2012). Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 251-262.
- PÉREZ, G. B. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región Centro Occidente de México. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 28, p. 97-105.
- SILVA, C. L. da (2018). Proposal of a dynamic model to evaluate public policies for the circular economy: Scenarios applied to the municipality of Curitiba. **WASTE MANAGEMENT**, v. 78, p. 456-466, 2018.
- SILVA, C. L. da; WEINS, N. W. ; POTINKARA, M. (2019) . Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics. **WASTE MANAGEMENT**, v. 99, p. 79-89.
- SILVA, C. L. da; FUGII, G. M.; SANTOYO, A. H. (2017). Proposta de um modelo de avaliação das ações do poder público municipal frente às políticas de gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: um estudo aplicado ao município de Curitiba. **URBE, Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. 2, p. 276-292, mai./ago.

- SILVA, C. L. da (2016). **Avaliação da política municipal da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos de Curitiba**. Curitiba: Ed. do autor.
- SILVA, C. L. da. *et al.* (2015). O que é relevante para planejar e gerir resíduos sólidos? Uma proposta de definição de variáveis para a formulação e avaliação de políticas públicas. **Biblio 3w: revista bibliográfica de geografia y ciencias sociales**, v. 20, n. 1114, p. 1-25.
- SILVA, C. L. da. Política pública para o planejamento urbano territorial a partir da economia circular: reflexões e alinhamentos propositivos para as cidades brasileiras. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 15, p. 159-172, 2019.
- SIMONETTO, E. de O. (2014). Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste—an approach using systems dynamics. **International Journal of Environment and Sustainable Development** 8, v. 13, n. 4, p. 339-353.
- SIMONETTO, E. de O.; LÖBLERB, M. L. (2014). Simulação baseada em System Dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos. **Production**, v. 24, n. 1, p. 212-224.
- SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DE SANEAMENTO (2021). Disponível em <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>. Acesso em: 15/12/2021.
- SOUZA, C. (2006). Políticas Públicas: uma revisão da literatura. **Sociologias**. nº 16, p. 20-45, jul/set.
- STERMAN, J. D. (2000). **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
- SUFIAN, M. A.; BALA, B. K. (2007). Modeling of urban solid waste management system: the case of Dhaka city. **Waste Management**, v. 27, n. 7, p. 858-868, 2007.
- SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, v. 52, p. 50-61.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. (2002). Handbook of solid waste management. **Landfilling**. New York: McGraw-Hill.
- TISSERANT, A. *et al.* (2017). Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 628-640.
- TOZAN, Y.; OMPAD, D. C. (2015). Complexity and Dynamism from an Urban Health Perspective: a Rationale for a System Dynamics Approach. **Journal of Urban Health**, v. 92, n. 3, p. 490-501.
- TREVISAN, A. P. BELLEN, H. M. (2008). Avaliação de políticas públicas: uma revisão teórica de um campo em construção. **Revista de Administração Pública**. v. 42, n. 3, p. 529-550, 2008.
- TSOLAKIS, N.; ANTHOPOULOS, L. (2015). Eco-cities: An integrated system dynamics framework and a concise research taxonomy. **Sustainable Cities and Society**, v. 17, p. 1-14.
- VON BERTALANFFY, L. (2015). **Teoria geral dos sistemas**. 8 ed. Petrópolis: Vozes.
- ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. (2003). Gerenciamento integrado de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JUNIOR (Coord). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, p. 1-18.