

Simulação Baseada em *System Dynamics* para Avaliação de Cenários sobre Geração e Disposição de Resíduos Eletrônicos em uma Instituição de Ensino Superior

<http://dx.doi.org/10.21527/2237-6453.2019.47.357-372>

Recebido em: 5/11/2017

Aceito em: 20/12/2018

Ana Amélia Zwicker,¹ Jardel Romeu Schneider,² Gabriela Beltrame,³
Eugênio de Oliveira Simonetto,⁴ Mauri Leodir Lobler⁵

RESUMO

No presente trabalho é proposto um modelo de simulação computacional – desde seu desenvolvimento até sua validação – empregando a metodologia *System Dynamics*. Essa técnica permitiu verificar e analisar os cenários acerca da compra de equipamentos eletrônicos nos últimos dez anos, bem como da geração e do descarte de lixo eletrônico em uma Instituição de Ensino Superior, utilizada como um caso para validar o modelo a partir de dados reais. Com o uso do modelo, pode-se concluir que, com a simples adoção de uma taxa de reuso de 25%, o quantitativo de lixo eletrônico relacionado a computadores e a impressoras reduz significativamente ao longo dos anos – cerca de 1/3 para impressoras e mais da metade para computadores. Dessa forma, recomenda-se o estímulo à prática do reuso dos equipamentos eletrônicos por meio de ações de conscientização e de campanhas de divulgação destinadas a toda a comunidade acadêmica da instituição pesquisada.

Palavras-chave: Lixo eletrônico. Reuso. Instituição de Ensino Superior.

SIMULATION BASED ON SYSTEM DYNAMICS FOR THE EVALUATION OF SCENARIOS ON THE GENERATION AND DISPOSAL OF ELECTRONIC WASTE IN AN INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION

ABSTRACT

In the present work, a computational simulation model is proposed – from its development to its validation – using the *System Dynamics* methodology. This technique allowed to verify and analyze the scenarios about the purchase of electronic equipment in the last ten years, generation and disposal of electronic waste in a Higher Education Institution used as a case to validate the model with real data. With the use of the model, one can conclude that with a simple adoption of a reuse rate of 25% (twenty five percent), the amount of electronic waste related to computers and printers reduces significantly over the years – about 1/3 (one third) for printers, and more than half for computers. Thus, it is recommended to stimulate the practice of reuse of electronic equipment, through awareness-raising actions and dissemination campaigns aimed at the entire academic community of the research institution.

Keywords: E-waste. Reuse. Institution of higher education.

¹ Mestre e estudante de Doutorado em Administração pelo Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Servidora pública da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). ana.ameliamz@gmail.com

² Mestre em Administração pelo Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Servidor público da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). jardelrs@yahoo.com.br

³ Mestre e estudante de Doutorado em Administração pelo Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). gabibeltrame@hotmail.com

⁴ Doutor em Administração pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). eosimonetto@ufsm.br

⁵ Doutor em Administração pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). mlobler@gmail.com

Nas últimas décadas, a indústria vem revolucionando o mundo com equipamentos eletroeletrônicos, os quais se tornaram onipresentes na vida da população. Mesmo os produtos eletrônicos que, à primeira vista, são inofensivos, geram sérias consequências ambientais, assim como econômicas e sociais. Segundo Torres (2008), a indústria de computadores e periféricos é uma das que mais consome recursos naturais, como água e energia, em proporção ao peso dos produtos gerados, provocando, assim, um considerável impacto ambiental. Nesse cenário, o lixo eletrônico é um problema mundial e, embora possa ser medido pela popularização da tecnologia em todo o planeta, há poucos projetos voltados à resolução desse problema.

A reciclagem é um termo utilizado para indicar o reaproveitamento ou a reutilização de um material que, por algum motivo, foi rejeitado. A partir da reciclagem, é possível diminuir a quantidade de lixo descartado na natureza e a quantidade de energia e de matéria-prima necessárias para a produção de novos produtos. Desse modo, é extremamente importante que as pessoas e as organizações se conscientizem em relação aos impactos que causam ao meio ambiente e promovam ações práticas para a redução de tais impactos (LOUREDO, 2015).

A Instituição de Ensino Superior (IES) analisada neste estudo compra, anualmente, centenas de equipamentos eletrônicos, os quais, segundo Silva (2013), duram, em média, cinco anos. Após esse período, a maioria dos equipamentos é descartada, gerando toneladas de lixo eletrônico. Se esse lixo não for bem-gerido, com mecanismos de destinação definidos e adequados, poderá trazer graves danos ambientais e sociais.

Neste trabalho objetiva-se apresentar um modelo ideal para gerenciamento de compras e reuso de equipamentos eletrônicos de uma IES, discutindo sobre a modelagem, o desenvolvimento e a validação de um modelo de simulação computacional para analisar a situação da instituição nos últimos dez anos. A partir dessa simulação, espera-se obter um modelo ideal de gerenciamento para os próximos dez anos, em que o reuso esteja presente a uma taxa de 25%, avaliando-se, assim, o impacto da utilização dessa taxa de reuso ao longo dos anos. Para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional utilizam-se técnicas oriundas da área de *System Dynamics*.

O uso de Tecnologia de Informação (TI) adiciona qualidade ao processo decisório por meio do desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão e Sistemas Especialistas, utilizando dados históricos e realizando projeções de cenários futuros. Dessa forma, espera-se que este estudo possa auxiliar os gestores das Instituições de Ensino Superior a decidir e alocar os resíduos eletrônicos de uma maneira mais racional e sustentável, considerando as possibilidades existentes.

REFERENCIAL TEÓRICO

Apresenta-se, a seguir, o referencial teórico sobre lixo eletrônico, reciclagem, reuso e logística reversa.

Lixo Eletrônico

As últimas cinco décadas foram marcadas por uma escalada crescente no uso da TI em todas as esferas da atividade humana, de tal modo que, atualmente, a tecnologia é parte indissociável da vida das pessoas e das organizações. A TI não somente trou-

xe mais eficiência às operações, como viabilizou modelos de negócios anteriormente inimagináveis. Na vida pessoal, trouxe mais facilidade para a realização de tarefas corriqueiras do dia a dia, proporcionando, ainda, quebra de fronteiras, crescimento econômico, inclusão digital, ampliação e integração de mercados (JAYO; VALENTE, 2010).

Para Siqueira (2009), o desenvolvimento e a difusão abrangente da TI são hoje as principais fontes de transmissão e aceleração do progresso técnico. A atenção não se restringe, no entanto, aos benefícios que essa área proporciona, posto que nos últimos anos o debate tem se voltado a uma temática que, até então, vinha recebendo pouco destaque: a preocupação com o impacto ambiental do uso intensivo de tecnologia, que implica toneladas de lixo eletrônico e um consumo energético exacerbado em todo o mundo (JAYO; VALENTE, 2010).

Considera-se lixo eletrônico os resíduos de rápida obsolescência de equipamentos eletrônicos, que incluem, entre outros dispositivos, computadores e eletrodomésticos (GUERIN, 2008). Segundo Perkins *et al.* (2014), lixos eletrônicos gerados a partir de equipamentos eletroeletrônicos são comumente divididos em três categorias principais: grandes eletrodomésticos (frigoríficos e máquinas de lavar), tecnologia da informação (computadores pessoais, monitores e computadores portáteis) e equipamentos de consumo (televisores, DVDs, telefones celulares, tocadores de mp3 e equipamentos esportivos e de lazer).

O lixo eletrônico tem recebido crescente atenção nos últimos dez anos (STEP, 2015), em grande parte pelo fato de que é uma, senão a maior, fonte de crescimento de resíduos sólidos em todo o mundo (PERKINS *et al.*, 2014). Considerando que muitos fluxos de resíduos estão em declínio, o lixo eletrônico continua crescendo a uma taxa de aproximadamente 5% ao ano. A Organização das Nações Unidas (ONU) calcula que esse crescimento pode chegar a 500% na próxima década em países desenvolvidos (STEP, 2015). O fim da vida útil de equipamentos elétricos e eletrônicos também aumenta no mundo em um ritmo alarmante, em torno de 3% a 5% ao ano, de acordo com Wibowo e Deng (2015), não mostrando sinais de diminuição.

A ONU avalia que, no mundo, são descartados anualmente cerca de 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico. O Brasil produz a segunda maior quantidade de lixo eletrônico da América – cerca de 1,5 milhão de toneladas por ano –, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que produzem 6,3 milhões de toneladas/ano (GLOBAL E-WASTE MONITOR, 2017). De acordo com o Step (2015), cada pessoa produz, por ano, cerca de 7 kg deste lixo. Nesse cenário global, a indústria eletrônica continua em crescente expansão.

Na última década, as pesquisas sobre lixo eletrônico tiveram grande crescimento. A imprensa especializada e as ONGs ambientais estão entre os primeiros a chamar a atenção para o lixo eletrônico como um problema emergente (LEPAWSKY, 2015). Com o elevado uso de equipamentos eletrônicos no mundo, esse tipo de lixo tem se tornado um grande problema ambiental quando descartado em locais inadequados. Essa questão mostra-se particularmente preocupante ao considerar que os equipamentos eletrônicos, além de se caracterizarem pela rápida obsolescência, possuem, em sua composição, substâncias altamente tóxicas, de modo que, se reciclados, podem causar sérios danos à saúde humana e, se descartados, representam ameaça de contaminação do solo e dos lençóis freáticos (JAYO; VALENTE, 2010).

Tal problema é de tamanha complexidade que, em diversos países, foram criadas legislações próprias para o correto descarte e a minimização de danos à saúde e ao meio ambiente. No Brasil, foi aprovada em 5 de agosto de 2010 a Lei Federal nº 12.305, referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos, que torna obrigatório providenciar o destino adequado a esses resíduos, conforme descrito a seguir:

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010, p. 3).

Reciclagem, Reuso e Logística Reversa

A preocupação da sociedade quanto ao ambiente nos últimos anos faz com que consumidores e empresas se inquietem com a situação do descarte de resíduos. Nesse contexto, para aumentar sua competitividade, as empresas começaram a compreender que podem obter ganhos financeiros, juntamente com benefícios ambientais obtidos das atividades da logística reversa (SILVA *et al.*, 2012).

Apesar de o Brasil estar entre os maiores mercados mundiais de celulares e computadores, ainda não existe uma política nacional para o descarte ou o reuso desses equipamentos no país. A Política Nacional de Resíduos Sólidos menciona a responsabilidade compartilhada de fabricantes, importadores, distribuidores e vendedores na efetivação da logística reversa de resíduos sólidos, mas não regulamenta especificamente o que deve ser feito quanto ao lixo eletroeletrônico.

Reciclar é a alternativa mais viável para o lixo eletrônico. A reciclagem consiste em separar os materiais que compõem um objeto e prepará-los para serem usados novamente como matéria-prima dentro do processo industrial (FERREIRA; BEZERRA DA SILVA; GALDINO, 2010). O processo de reciclagem pode acontecer por meio do reuso ou da recuperação de resíduos ou de seus constituintes que apresentam algum valor econômico (SILVA, 2013). Uma vantagem do reuso de equipamentos eletrônicos é que ele fornece algumas peças de reposição para equipamentos da própria instituição, além de beneficiar projetos sociais, favorecendo comunidades que não teriam acesso a estes.

Em um país como o Brasil, medir a reciclagem constitui um trabalho complexo, devido ao grau de informalidade do mercado, à inexistência de dados oficiais consistentes e abrangentes, à dimensão territorial, às diferentes realidades e à diversidade de atores que participam desse mercado. O país, contudo, possui o maior centro público de descarte e reuso de lixo eletrônico da América Latina, o qual funciona em um galpão de 450 metros quadrados na Universidade de São Paulo (USP), por intermédio de um programa de responsabilidade socioambiental intitulado Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (Cedir). Trata-se de um projeto pioneiro de tratamento de lixo eletrônico em um órgão público. Inaugurado em 2009, esse programa tem como objetivo instituir práticas de reuso e descarte sustentável de lixo eletrônico, incluindo bens de informática e telecomunicações que ficam obsoletos. Para o local são levadas até 20 toneladas de resíduos por mês, quantia que passa por uma categorização, triagem e destinação final, impossibilitando o descarte na natureza e possibilitando o seu reaproveitamento na cadeia produtiva.

No que diz respeito à IES foco deste artigo e utilizada para construção do modelo, existe um Plano de Gestão de Logística Sustentável (PLS 2013-2015) servindo como instrumento de planejamento para definir objetivos, responsabilidades e prazos para que a instituição possa estabelecer práticas de sustentabilidade e racionalização de gastos e processos. Um dos objetivos do PSL é o destino correto dos resíduos gerados na IES. No Quadro 1 apresenta-se um resumo desse objetivo.

Quadro 1 – Objetivo do PLS de destinar corretamente os resíduos

Metas	Ações	Detalhamento de Implementação das Ações	Indicadores
Aumentar em 50% a destinação correta dos resíduos gerados na IES, com o mapeamento dos <i>containers</i> e a criação de rotinas para o recolhimento dos lixos recicláveis nos setores.	Destinação e formas de acondicionamento corretas dos resíduos.	Utilização de sacos coletores com as cores correspondentes ao tipo de lixo.	Quantidade de resíduos gerados (kg).
	Mapeamento dos <i>containers</i> e criação de rotinas para o recolhimento dos lixos recicláveis nos setores.	Realização de levantamento sobre a geração de resíduos nas unidades e em toda a IES.	Quantidade de material reciclável destinado (kg).
	Padronização dos <i>containers</i> coletores de resíduos de acordo com as normas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama).	Instalação nos setores coletores e <i>containers</i> da identificação pertinente para cada tipo de resíduo.	Quantidade de resíduos especiais destinados (kg e L).
Construir a Central de Gerenciamento de Resíduos (CGR).	Projeto, orçamento e execução da CGR no <i>campus</i> sede da IES.	O projeto está sendo realizado pelo setor de urbanismo da Pró-Reitoria de Infraestrutura (Proinfra).	
Fomentar a Logística Reversa (LR).	Recolhimento dos bens inservíveis para o processo de reutilização.	Implementação do sistema de LR nas contratações de pneus, lâmpadas, pilhas, baterias, óleos, produtos eletroeletrônicos.	Quantidade anual de bens inservíveis.

Fonte: Adaptado da IES.

Em relação à logística reversa especificada no PLS da IES, trata-se de um fluxo ou movimento de produtos, materiais e embalagens na direção oposta à tradicional, com o objetivo de criar ou recapturar valor ou, simplesmente, de descartá-los corretamente (TIBBEN-LEMBKE; ROGERS, 2002). A logística reversa, para Rogers e Tibben-Lembke (2002), é:

o processo de planejamento, implementação e controle do fluxo eficiente e de baixo custo de matérias-primas, estoque em processo, produto acabado e informações relacionadas, desde o ponto de consumo até o ponto de origem, com o propósito de recuperação de valor ou descarte apropriado para coleta e tratamento de lixo.

Além de tentar efetivar de forma eficaz o PLS, a IES necessita adequar-se às normas impostas pelo país. No Brasil, há a Instrução Normativa nº 01, de 19 de janeiro de 2010, que dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras, e a Portaria SLTI/MP nº 02, de 16 de março de 2010, que estabelece as especificações-padrão de bens de TI que se enquadram no âmbito da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dá outras providências.

Dessa forma, a IES deve certificar-se de que os bens sejam constituídos, no todo ou em parte, por material reciclado, atóxico, biodegradável (conforme ABNT NBR - 15448-1 e 15448-2) e que estejam sendo observados os requisitos ambientais para a obtenção de certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), com a utilização de produtos sustentáveis ou de menor impacto ambiental em relação aos seus similares. Além disso, deve dar preferência aos computadores sustentáveis, também chamados de TI verde, utilizando, assim, materiais que reduzem o impacto ambiental.

Simulação Computacional

A simulação computacional de sistemas, segundo Kelton, Sadowski e Sadowski (1998), consiste no emprego de um conjunto de métodos e técnicas matemáticas com o objetivo de imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente utilizando computadores e softwares. O uso de ferramentas e ambientes de simulação computacionais permite testar diferentes políticas e soluções para a operação de um sistema, avaliando o impacto de suas decisões e proporcionando um conjunto de instrumentos para a compreensão e a comunicação sobre os modelos construídos (PIDD, 1984).

Uma das técnicas utilizadas para a simulação computacional é a metodologia *System Dynamics*, a qual foi empregada para a elaboração deste trabalho.

System Dynamics

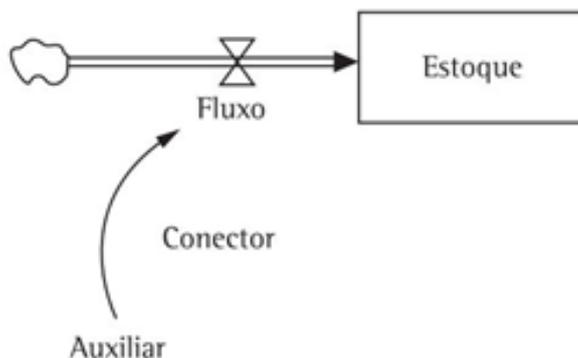
A metodologia *System Dynamics* foi desenvolvida pelo engenheiro Jay Forrester, do Instituto Tecnológico de Massachussets, na década de 50 do século 20 (SIMONETTO; LÖBLER, 2014). Uma das principais etapas de um estudo de simulação consiste na criação de um modelo lógico. A utilização da *System Dynamics* permite o estudo do comportamento dos sistemas ao longo do tempo, sendo possível aumentar ou diminuir as entradas e saídas de produtos no sistema, alterando, assim, as consequências das decisões (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005). Isso acontece como se fosse um conjunto de elementos que interage continuamente produzindo variações. Por meio da simulação, pode-se imitar o comportamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (LAW; KELTON, 1991).

Forrester (1989) mencionou que tendências do *System Dynamics* visam a mudar os modelos mentais que as pessoas usam para representar o mundo real. Para fazer isso, uma pessoa deve tornar-se suficientemente envolvida no processo de modelagem para interiorizar as lições sobre o comportamento dinâmico de realimentação.

Em *System Dynamics*, um modelo é construído com basicamente quatro componentes: a) estoques, b) fluxos, c) auxiliares e d) conectores. A Figura 1 apresenta cada um dos componentes de um modelo de *System Dynamics*.

Quanto aos estoques, eles são variáveis de estado, que podem ser consideradas repositórios onde algo é acumulado, armazenado e potencialmente passado para outros elementos do sistema (DEATON; WINEBRAKE, 2000). As mudanças no estoque não são instantâneas: elas demandam certo tempo e ocorrem em virtude da ação dos fluxos.

Figura 1 – Comportamento de um modelo de System Dynamics



Fonte: SIMONETTO; LÖBLER, 2014.

Por sua vez, os fluxos são variáveis de ação e podem aumentar ou diminuir o volume dos estoques, alterando-os. Já os auxiliares servem para formular os dados com o intuito de definir as equações dos fluxos, tendo como função combinar, por meio de operações algébricas, fluxos, estoques e outros auxiliares. Além disso, eles são utilizados para modelar as informações e não o fluxo físico, sendo capazes de se alterarem instantaneamente (COVER, 1996).

Por fim, existem os conectores, que consistem nos elementos que representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que estabelecem as ligações entre os componentes que formarão a expressão algébrica (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

METODOLOGIA

Neste trabalho, a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseada no método proposto por Law e Kelton (1991), que abrange as seguintes etapas: a) realização de estudos exploratórios em artigos científicos, dissertações e teses, além de entrevistas com os gestores do ambiente simulado (no caso, com os gestores de uma IES, e com pesquisadores da área de resíduos sólidos, especificamente da área de lixo eletrônico, o que permitiu identificar e estruturar o problema; b) desenvolvimento da solução, por meio da construção de modelos formais capazes de representar e reproduzir o problema; c) implementação computacional da solução, utilizando-se, para isso, do simulador Vensim® PLE (VENTANA SYSTEMS, 2015), da área de *System Dynamics*; e d) validação da solução, por intermédio de testes em laboratório e análise do comportamento histórico, a fim de verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade (ou seja, se representam a realidade), bem como por intermédio da simulação de um experimento, empregando-se, para isso, dois cenários para cada uma das duas espécies de gênero de lixo eletrônico (computadores e impressoras) que constituem o objeto deste estudo.

Os cenários usados para a validação do modelo foram gerados a partir de análises feitas com base em dados históricos relativos às compras e às baixas dos equipamentos eletrônicos objetos deste estudo – computadores e impressoras (jato de tinta e a *laser*) –, de 2005 a 2014 (dez anos), de uma IES situada no Estado do Rio Grande Sul. Ademais, a validação do modelo contou com a participação de gestores e pesquisadores da área de resíduos sólidos, mais especificamente da área de lixo eletrônico.

Variáveis e o Modelo de Simulação

Atualmente verifica-se uma crescente geração de resíduos sólidos por parte da população, o que demanda a criação e a execução de alternativas para um melhor aproveitamento desses resíduos. Diante disso, a reciclagem e o reaproveitamento surgem como alternativas viáveis, pois, no momento em que o material é reciclado ou reaproveitado, ele passa a não mais poluir o meio ambiente e a não mais utilizar recursos naturais em excesso para a sua transformação (LOUREDO, 2015).

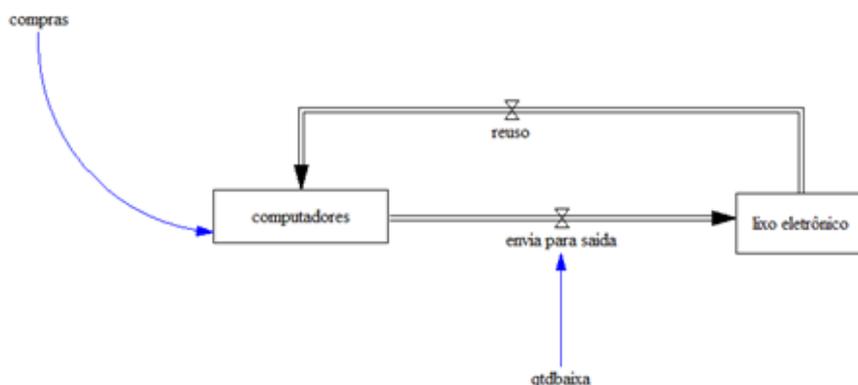
Neste estudo procura-se utilizar no modelo o conceito da reciclagem, notadamente do reuso de equipamentos eletrônicos, ou seja, de computadores e impressoras. Ao reutilizar, além de propiciar a ampliação da vida útil do produto, diminui-se a extração de matérias-primas para a fabricação de novos produtos (LOUREDO, 2015).

Desse modo, tendo em vista a importância da reciclagem, mais especificamente do reuso, para a preservação do meio ambiente e os ganhos ambientais associados, este trabalho buscou o desenvolvimento de um modelo de simulação que permita aos gestores de TI e aos gestores da área ambiental avaliarem políticas de reciclagem/reaproveitamento dos equipamentos eletrônicos de uma IES, visando o desenvolvimento sustentável da instituição. No modelo avaliou-se a quantidade de lixo eletrônico gerada, sem ou com taxa de reuso. Para a definição das variáveis do modelo de simulação apresentado nas Figuras 2 e 3, foram realizadas entrevistas com dois gestores e com dois pesquisadores da área, por meio das quais se constatou toda a sistemática do problema em estudo. Além disso, foram consultados trabalhos acadêmicos e governamentais relacionados à temática dos resíduos e do lixo eletrônico. As variáveis selecionadas, bem como as suas inter-relações, que influenciam a quantidade de lixo eletrônico armazenado sem qualquer destinação, são as seguintes:

- a. variável estoque “*computadores (ou impressoras)*” – obtida a partir da variável “*compras*”, apresenta a quantidade de equipamentos incorporados à instituição durante 20 anos, sendo os dez primeiros anos correspondentes às variações provenientes de quantidades históricas de compras, de 2005 a 2014. Os dez anos seguintes, de 2015 a 2024, correspondem às variações futuras provenientes da quantidade média de compras (derivada da média aritmética histórica) da taxa de reuso do lixo eletrônico (“*reuso*”). Essa variável encontra-se representada na Equação 1 do modelo de equações apresentado no Quadro 2;
- b. variável estoque “*lixo eletrônico*” – foi obtida por meio da diferença entre aquilo que seria descartado como lixo eletrônico, após cinco anos da incorporação do equipamento à instituição (“*qtdbaixa*”), e o produto entre a taxa de reuso (“*reuso*”) e a quantidade de lixo eletrônico (“*lixo eletrônico*”). Essa variável é descrita na Equação 2 do modelo de equações apresentado no Quadro 2;
- c. variável auxiliar “*compras*” – traz a variação relativa à quantidade de compras realizada pela organização. Os dez primeiros anos apresentam quantitativos históricos, e os dez anos seguintes mostram projeções futuras e quantidade fixa derivada da média aritmética dos quantitativos históricos. Essa variável não apresenta equação;
- d. variável auxiliar “*qtdbaixa*” – traz o quantitativo de itens que, após cinco anos da compra, será considerado lixo eletrônico. Essa variável também não apresenta equação;

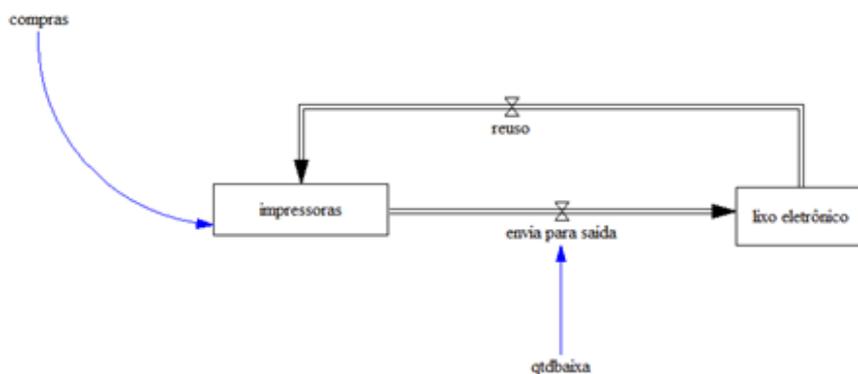
- e. variável fluxo “*envia para saída*” – aumenta o volume da variável-estoque “*lixo eletrônico*” e diminui o volume da variável estoque “*computadores (ou impressoras)*”, por meio da sua relação direta com a variável-auxiliar “*qtdbaixa*”. Essa variável encontra-se concebida na Equação 3 do modelo de equações apresentado no Quadro 2;
- f. variável fluxo “*reuso*” – diminui o volume da variável-estoque “*lixo eletrônico*” e aumenta o volume da variável-estoque “*computadores (ou impressoras)*”, por meio da estipulação de um índice de reaproveitamento daquilo que fora considerado lixo eletrônico. Por intermédio da variação desse índice é que se observará o comportamento (cenário) da variável-estoque “*lixo eletrônico*” durante os anos. Essa variável não apresenta equação, mas um índice a ser determinado para a observação/análise dos cenários.

Figura 2 – Modelo de simulação desenvolvido (computadores)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 3 – Modelo de simulação desenvolvido (impressoras)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Quadro 2 – Formulação matemática do modelo de simulação desenvolvido

Equação	Fórmula Matemática
(1)	$Computadores(t)/impressoras(t) = compras(t) - envia\ para\ saída(t) + reuso(t)$
(2)	$lixo\ eletrônico(t) = envia\ para\ saída(t) - [lixo\ eletrônico(t) * reuso(t)]$
(3)	$envia\ para\ saída(t) = qtdbaixa(t)$

Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale salientar que os quantitativos históricos relativos às compras (variável-auxiliar “compras”) foram obtidos junto a IES investigada neste estudo. Esses dados são apresentados no Quadro 3.

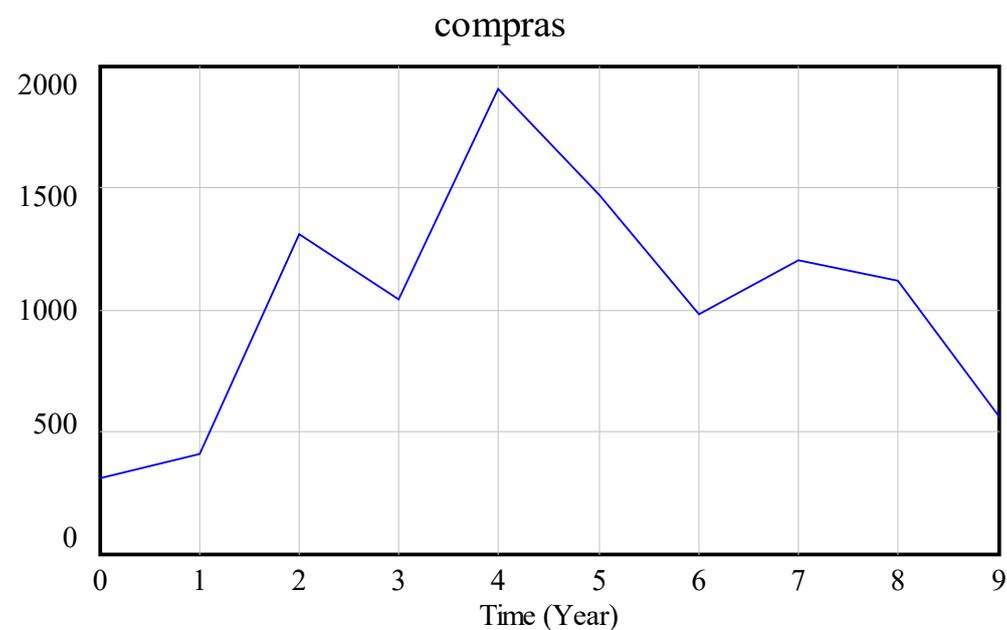
Quadro 3 – Valores históricos de compras e média aritmética

Variável auxiliar “compras” (computadores)		Variável auxiliar “compras” (impressoras)	
Ano	Quantidade	Ano	Quantidade
0 (2005)	310	0 (2005)	135
1 (2006)	406	1 (2006)	160
2 (2007)	1.311	2 (2007)	317
3 (2008)	1.039	3 (2008)	132
4 (2009)	1.901	4 (2009)	128
5 (2010)	1.467	5 (2010)	317
6 (2011)	978	6 (2011)	86
7 (2012)	1.200	7 (2012)	187
8 (2013)	1.116	8 (2013)	156
9 (2014)	561	9 (2014)	561
10 – 19 (2015-2024)	1.029 (média aritmética)	10 – 19 (2015-2024)	175 (média aritmética)

Fonte: Elaborado pelos autores.

A seguir constam as ilustrações da evolução histórica das compras de computadores e impressoras de 2005 (ano 0) a 2014 (ano 9) (Gráficos 1 e 2).

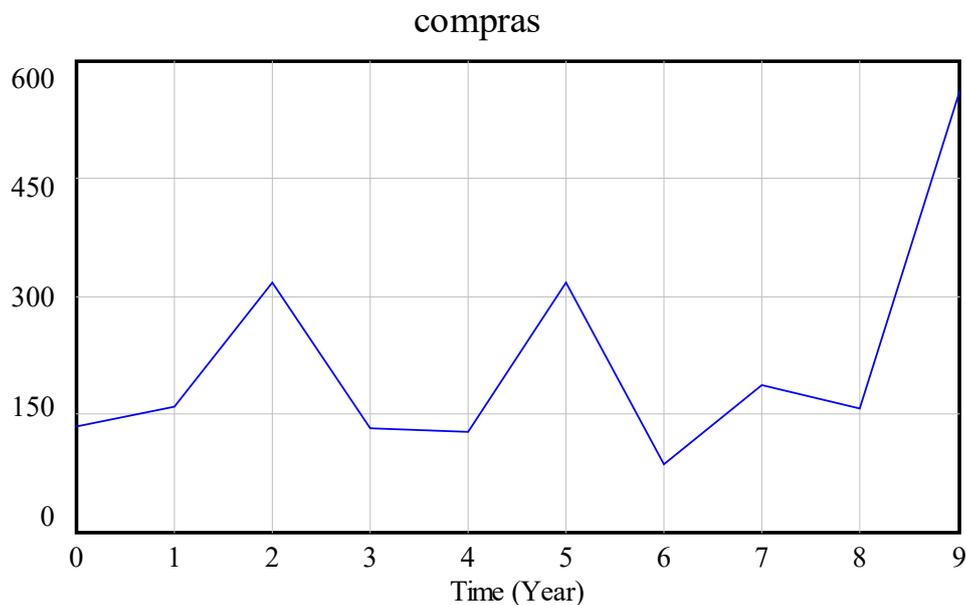
Gráfico 1 – Evolução histórica das compras de computadores



compras : Cenário 1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 2 – Evolução histórica das compras de impressoras



compras : Cenário 1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Apresentam-se, também, os valores iniciais das variáveis-estoque, os quais são os quantitativos que já constavam como compras ou lixo eletrônico (Quadro 4).

Quadro 4 – Valores iniciais das variáveis-estoque

Variável estoque	Valor inicial
“computadores/impressoras”	= 0 (computadores e impressoras)
“lixo eletrônico”	= 897 (computadores) e 108 (impressoras)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ademais, quanto à variável fluxo “reuso”, foi utilizado o índice de 0%, que é o que atualmente se observa na instituição, e a taxa de 25% como meta a ser alcançada, justificada anteriormente.

Validação e Experimentação do Modelo

O modelo foi validado em diferentes etapas. Inicialmente foram usadas informações obtidas em artigos científicos, dissertações e teses, além de entrevistas com os gestores do ambiente simulado e com os pesquisadores da área de resíduos sólidos, mais especificamente da área de lixo eletrônico. Assim, fica caracterizada a validação nominal, posto que foram utilizados dois especialistas (um da área de sistemas e outro da área ambiental) para auxiliar na definição das variáveis relevantes a serem empregadas na modelagem proposta.

Em seguida, na segunda etapa de validação, referente à execução do modelo no simulador Vensim® PLE (VENTANA SYSTEMS, 2015) da área de *System Dynamics*, foram utilizados relatórios (de compras e de quantitativo atual de lixo eletrônico) obtidos junto a IES objeto deste estudo, além de informações relativas ao reuso do lixo eletrônico,

conseguidas com os gestores da organização, com o objetivo de verificar a integração entre todas as variáveis componentes do modelo e de efetuar a análise dos resultados gerados. Assim, avaliaram-se as saídas produzidas pelo modelo de simulação a partir dos dados reais.

Na última fase da validação, para a construção do experimento foram utilizados dados reais referentes às compras (computadores e impressoras). Já as taxas de reuso foram lastreadas na realidade atual da organização (0%) e em informações de estudos da área para a projeção de cenário (25%). Quanto às projeções futuras referentes às compras, fez-se uso da média aritmética dos dados históricos da instituição, projetados para os próximos dez anos. Assim, foram gerados cenários a serem simulados no modelo. O detalhamento de cada cenário simulado é apresentado em seguida.

Cenários Simulados no Modelo

Para a validação e experimentação do modelo de simulação desenvolvido, foram gerados os cenários descritos a seguir.

Cenário Atual

Para a representação do cenário atual foram empregados os dados reais de compra de computadores e impressoras observados nos anos de 2005 a 2014 (ano 0 a 9), provenientes de relatório da instituição sobre a situação do material (computadores e impressoras) por período. A partir desses dados, apresentados para proporcionar maior compreensão em relação à situação do lixo eletrônico na instituição estudada, foram projetados dois cenários futuros, um para cada modelo simulado (computadores e impressoras).

Ressalta-se que as informações expostas nos Gráficos 1 e 2 deste artigo foram apresentadas com o intuito de ilustrar a situação histórica das compras de computadores e impressoras da instituição analisada. Assim, esses panoramas foram exibidos separadamente a título de informação e, portanto, não foram utilizados para fins de análise de cenário.

Cenário Futuro sem Variação das Quantidades e sem Taxa de Reuso

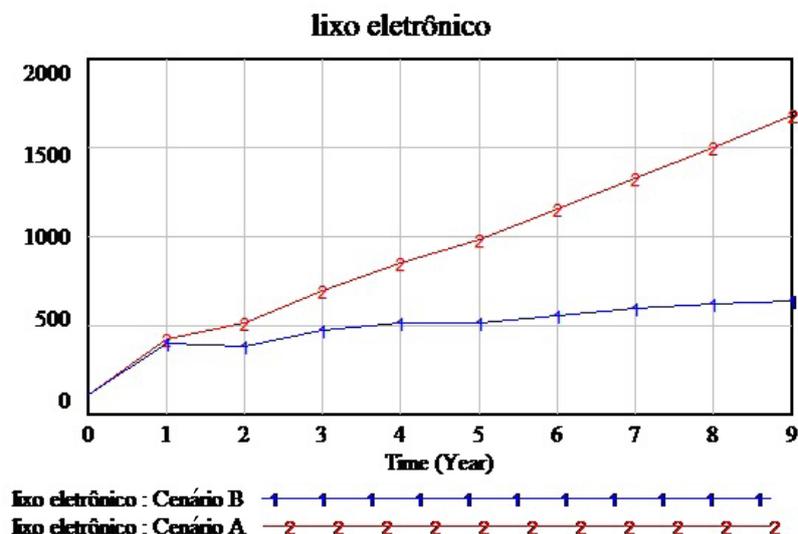
Para a simulação cenário futuro sem variação das quantidades e sem taxa de reuso, foram considerados os dados reais de compra e baixa de computadores e impressoras observados nos anos de 2005 a 2014. A partir desses dados, calculou-se uma média de compra para os próximos dez anos, de forma que essa média permaneceu a mesma por todo o período simulado. Assim, a data zero (0) dos gráficos apresentados corresponde ao ano de 2015, e a data 9 corresponde ao ano de 2024. Além disso, considerou-se a vida útil desses equipamentos como sendo de cinco anos, conforme apontado por Silva (2013).

Cenário Futuro sem Variação das Quantidades e com Taxa de Reuso

Para a simulação do cenário futuro sem variação das quantidades e com taxa de reuso, foram utilizados os mesmos dados do cenário anterior, acrescentando-se, porém, uma taxa anual de reuso de 25% para computadores e impressoras, seguindo a mesma

Quanto à geração de lixo eletrônico relacionado a impressoras, verificou-se, também, que o melhor resultado pode ser encontrado na segunda projeção (Cenário B), ou seja, com a utilização de uma taxa de reuso de 25%, conforme sugeriu Secti (2010). Essas constatações empíricas podem ser verificadas na Figura 5.

Figura 5 – Resultado sobre geração de lixo eletrônico – impressoras



Fonte: Elaborada pelos autores.

Pode-se visualizar na Figura 5 que a produção de lixo eletrônico gerada no Cenário A supera a quantidade de 1.500 impressoras. Já no Cenário B, essa quantidade encontra-se um pouco acima de 500 impressoras. É possível perceber, também, que, embora, em ambos os cenários, a quantidade de lixo eletrônico aumente, o e-lixo gerado no primeiro cenário (Cenário A) é praticamente o triplo do gerado no segundo (Cenário B). Nota-se, ainda, que, no Cenário A, há um aumento mais acelerado da quantidade de lixo eletrônico.

No estudo de Simonetto e Löbler (2014), em relação à quantidade de resíduos sólidos urbanos enviada para reciclagem em um município do Rio Grande do Sul, o melhor cenário simulado foi o que considerou a média de reciclagem da Holanda (com 28%) – a média do Brasil perfaz menos de 1%. No 15º ano de simulação o município analisado consegue atingir as taxas da Holanda.

Por meio da utilização do modelo, pode-se concluir que, com a adoção de uma taxa de reuso de 25%, o quantitativo de lixo eletrônico relacionado a computadores e a impressoras reduz significativamente: cerca de 1/3 para impressoras e mais da metade para computadores. Dessa forma, recomenda-se o estímulo à prática do reuso dos equipamentos eletrônicos por meio de ações de conscientização e de campanhas de divulgação destinadas a toda a comunidade acadêmica da instituição pesquisada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi apresentar um modelo ideal para gerenciamento de compras e reuso de equipamentos eletrônicos de uma IES, expondo a modelagem, o desenvolvimento e a validação de um modelo de simulação computacional para anali-

sar a situação da instituição nos últimos dez anos. A partir dessa simulação, o sistema foi capaz de estimar a quantidade de lixo eletrônico a ser gerada sem taxa de reuso e com taxa de reuso.

O modelo foi validado e avaliado a partir de dados de uma IES do Estado do Rio Grande do Sul. Por meio desses resultados, os gestores e as comissões de sustentabilidade da instituição estudada poderão estimar o quanto de lixo eletrônico será gerado no futuro e, assim, poderão discutir, avaliar e decidir possíveis medidas para a adequada destinação desses equipamentos. Além disso, os resultados apurados podem subsidiar futuras campanhas de conscientização.

Neste artigo sugeriu-se o reuso de computadores e impressoras. Ressalta-se, contudo, que a logística reversa também pode ser considerada uma forma de destinação ideal dentro do conceito de reciclagem. Destaca-se, ainda, que a instituição analisada possui um PLS, estando entre suas metas: a) a construção de um Centro de Gerenciamento de Resíduos; b) o fomento à logística reversa; e c) o aumento em 50% da destinação correta dos resíduos gerados.

Neste estudo foram apresentados cenários distintos quanto à geração de lixo eletrônico de computadores e de impressoras. A partir da situação atual, ilustrada para proporcionar maior compreensão em relação ao lixo eletrônico, projetaram-se os cenários futuros. Os resultados gerados foram exibidos a pesquisadores da área e aos gestores da instituição para fins de legitimação.

Os resultados das simulações do modelo permitem concluir que, com a adoção de uma taxa de reuso de 25%, o quantitativo de lixo eletrônico, relacionado a computadores e a impressoras, reduz significativamente – cerca de 1/3 para impressoras e mais da metade para computadores. Tendo em vista a proporção do impacto na redução do lixo eletrônico da instituição ao longo dos anos, recomenda-se o estímulo à prática do reuso, acompanhado de ações de conscientização e de campanhas de divulgação a toda a comunidade acadêmica.

Para trabalhos futuros, sugere-se incluir outras variáveis, tais como as relacionadas à logística reversa e a índices das atualizações da TI. Outra proposta a ser considerada é estudar a viabilidade da construção de um centro de reciclagem de resíduos eletrônicos na instituição, assim como acontece na USP (CEDIR, 2015) e como já é apontado no PLS da organização estudada.

Ressalta-se, ainda, que este modelo é configurável, sendo aplicável a outras instituições e a outros contextos decisórios. Ademais, ele pode subsidiar não somente políticas de sustentabilidade, mas também outras ações gerenciais.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. *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. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.
- CEDIR. Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática – USP. Disponível em: <http://www.cce.usp.br/?q=node/266>. Acesso em: 26 jun. 2015.
- COVER, J. *Introduction to System Dynamics*. [S.l.]: Powersim Press, 1996.
- CHANG, N.; WEI, Y. Siting recycling drop-off in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, p. 133-149, 2000.

- DAELLENBACH, H. G.; McNICKLE, D. C. *Decision making through systems thinking*. Basingstoke, N.Y: Palgrave Macmillan, 2005.
- DEATON, M. L.; WINEBRAKE, J. J. *Dynamic Modelling of Environmental Systems*. Nova York: Springer-Verlag, 2000.
- FERREIRA, D. C.; BEZERRA DA SILVA, J.; GALDINO, J. C. S. Reciclagem do e-lixo (ou lixo eletro-eletrônico). Sistema de Gerenciamento de Conferências (OCS). CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 5., 2000, Maceió. *Anais [...]*. Maceió, AL, Brasil, 2000.
- FORRESTER, J. W. The Beginning of System Dynamics. *Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society*. Stuttgart, Germany, July 1989.
- GLOBAL E-WASTE MONITOR. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>. Acesso em: 10 jun. 2018.
- GUERIN, M. *Consciência ecológica: reduzir, reusar e reciclar. Folha de Londrina*, 29 abr. 2008.
- JAYO, M.; VALENTE, R. Por uma TI mais verde. Especial: energia e sustentabilidade. *GV Executivo*, 9, (1), p. 52-57, 2010.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKY, D. A. *Simulation with Arena*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation Modeling & Analysis*. Nova York: McGraw-Hill, 1991.
- LEPAWSKY, J. The changing geography of global trade in electronic discards: time to rethink the e-waste problem. *The Geographical Journal*, 181, (2), p. 147-159, 2015.
- LOUREDO, P. *Educação ambiental e os 5 Rs*. 2015. Disponível em: <http://educador.brasilecola.com/estrategias-ensino/educacao-ambiental-os-5-rs.htm>. Acesso em: 13 jul. 2015.
- NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F. S. P. *Resíduos Eletroeletrônicos: Um desafio para o Desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos*. 3rd International Workshop – Advances in Cleaner Production. São Paulo, Brazil, May 18th-20ndth – 2011.
- PERKINS, D. N. *et al.* E-Waste: A Global Hazard. Icahn School of Medicine at Mount Sinai. *Annals of Global Health*, 80, p. 286-295, 2014.
- PIDD, M. *Computer simulation in management science*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, 1998. Disponível em: <http://equinox.unr.edu/homepage/logis/reverse.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2015.
- SECTI. Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Inovação. *Centro de Recondicionamento dá nova vida a equipamentos*, 2010. Disponível em: <http://www.secti.ba.gov.br/index.php/sobre-a-secti/468-centro-de-recondicionamentoda-nova-vida-a-equipamentos.html>. Acesso em: 2 jul. 2015.
- SILVA, B. G. *Gestão dos resíduos eletrônicos da UFSM: viabilidade e implementação de uma política de reciclagem*. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2013.
- SILVA, E. C. P. *O impacto da gestão do tamanho da força policial na taxa de violência em Curitiba: uma abordagem qualitativa sob o referencial da dinâmica de sistemas*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2006.
- SILVA A. P. de M. G. *et al.* O descarte de componentes eletrônicos como oportunidade empresarial. *Revista RETC*, 11(3), p. 4-12, 2012.
- SIMONETTO, E de O.; LÖBLER, M. L. Simulação baseada em *System Dynamics* para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos. *Production*. 24, (1), p. 212-224, 2014.
- SIQUEIRA, H. S. G. Globalização – a globalização sob a ótica da acumulação flexível. *Revistas Sociais e Humanas da UFSM*, 22, Edição Especial, 2009.
- STEP. *Solving the E-waste Problem*. E-waste Prevention, Take-back System Design and Policy Approaches, 2015.
- STEP. *Solving the E-waste Problem*. Recycling: from e-waste to resources. United Nations Environment Programme & United Nations University, 2009.
- STRAUS, L. M. *Um modelo em dinâmica de sistemas para o Ensino Superior*. 2010. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.
- TIBBEN-LEMBKE, R. S.; ROGERS, D. S. Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), p. 271-282, 2002.
- TORRES, M. A. *Lixo Eletrônico: O lado sujo da tecnologia*. Anexo XII, n. 73, abr. 2008. Disponível em: http://www.sciencenet.com.br/antigo/sciencepress/73/artigo2_73a.htm. Acesso em: 20 mar. 2016.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim Simulation Software*. Disponível em: <http://www.vensim.com>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- WIBOWO, S.; DENG, H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. *Waste Management Journal Elsevier*, 40, p. 127-135, 2015.