

SIMULAÇÃO BASEADA EM SYSTEM DYNAMICS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS SOBRE GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NUMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR

JARDEL ROMEU SCHNEIDER

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
jardelrs@yahoo.com.br

ANA AMÉLIA MOURA ZWICKER

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
ana.ameliamz@gmail.com

GABRIELA BELTRAME

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
gabibeltrame@hotmail.com

EUGÊNIO DE OLIVEIRA SIMONETTO

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
eosimonetto@ufsm.br

ÁREA: OPERAÇÕES

TEMA: GESTÃO DE OPERAÇÕES SUSTENTÁVEIS

**SIMULAÇÃO BASEADA EM SYSTEM DYNAMICS PARA AVALIAÇÃO DE
CENÁRIOS SOBRE GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS
NUMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR**

RESUMO

No presente trabalho é proposto um modelo de simulação computacional, desde seu desenvolvimento até a sua validação, utilizando a metodologia *System Dynamics*. Esta técnica permite verificar e analisar os cenários acerca da compra de equipamentos eletrônicos nos últimos dez anos na Instituição de Ensino Superior analisada e na geração e descarte do lixo eletrônico. A validação desse modelo foi feita através da construção de cenários futuros ideais, para os próximos dez anos, considerando aplicação e não aplicação de uma taxa de reuso. Os resultados das simulações do modelo permitem concluir que a adoção de uma taxa de reuso de 25% reduz significativamente o lixo eletrônico quanto a computadores e impressoras, confirmando assim a hipótese dinâmica do estudo. Espera-se que este modelo possa auxiliar os gestores das instituições de ensino a adotar ações de tecnologia da informação mais sustentáveis.

Palavras-chave: Lixo eletrônico; Reuso; TI Verde.

ABSTRACT

In this work, a model of computer simulation is proposed, since its development until their validation using System Dynamics methodology. This technique allows to verify and analyze the scenarios about the purchase of electronic equipment in the last ten years in a higher education institution analyzed and in the generation and disposal of e-waste. The validation of this model was performed by building future ideal scenarios, for the next ten years, whereas application and non-application of a reuse rate. The results of the model simulations indicate that applying a 25% of reuse rate significantly reduces the e-waste as computers and printers, confirming the dynamics hypothesis of this study. It is expected that this model may assist managers of educational institutions to adopt information technology actions more sustainable.

Keywords: E-waste; Reuse; Institution of higher education; Green IT.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria vem revolucionando o mundo com equipamentos eletroeletrônicos, os quais se tornaram onipresentes na vida da população. 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. O lixo eletrônico (LE) é um problema mundial e com poucos projetos para sua resolução. Este problema pode ser medido pela popularização da tecnologia em todo o planeta.

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

O objetivo desse trabalho é apresentar um modelo ideal para gerenciamento de compras e reuso de equipamentos eletrônicos de uma Instituição de Ensino Superior, apresentando a modelagem, o desenvolvimento e a validação de um modelo de simulação computacional para analisar a situação da instituição nos últimos 10 anos. A partir dessa simulação, será obtido um modelo ideal de gerenciamento para os próximos 10 anos, no qual o reuso seja incluso com uma taxa de 25%. Para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional foram utilizadas técnicas oriundas da área de *System Dynamics* (SD).

O uso de instrumentos da área de sistemas de apoio à decisão (SAP) procura adicionar qualidade ao processo decisório (CHANG;WEI, 2000). Desta forma, espera-se que este estudo possa auxiliar os gestores das Instituições de Ensino Superior a decidir e alocar os resíduos eletrônicos de uma forma mais racional e sustentável, considerando as possibilidades existentes.

Assim, este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada a metodologia de pesquisa utilizada para o desenvolvimento do estudo. Na seção 3 é exposta uma introdução à simulação computacional e à metodologia *System Dynamics*. O referencial teórico sobre lixo eletrônico, reciclagem, reuso e logística reversa encontra-se na seção 4. Na seção 5 são descritas as variáveis e o modelo de simulação. Na seção 6 são expostos a validação, os cenários de simulação e o experimento, utilizando o modelo, sendo que posteriormente os resultados são apresentados e discutidos. As considerações finais são apresentadas na seção 7.

2 METODOLOGIA

Simon (1990) assevera que a modelagem de sistemas pode ser classificada em dois tipos: predição e prescrição. Se o primeiro tipo for utilizado para prever o comportamento ao longo do tempo de grandes sistemas, ele não terá perspectivas de pleno êxito. Agora, se o segundo tipo for usado, ele terá maiores probabilidades de sucesso (SIMON, 1990; SIMONETO e LÖBLER, 2014).

Neste trabalho, a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseada no método proposto por Law e Kelton (1991), abrangendo assim as seguintes etapas: a) estudos exploratórios em artigos científicos, dissertações e teses, além de entrevistas com os gestores do ambiente simulado, no caso, uma Instituição Federal de Ensino Superior, e pesquisadores da área de resíduos sólidos, mais especificamente lixo eletrônico, por meio do que o problema foi caracterizado e estruturado; b) desenvolvimento da solução, por meio da construção de modelos formais capazes de representar o problema; c) implementação computacional da solução, utilizando-se para isso o simulador Vensim[®] PLE

(VENTANA SYSTEMS, 2015), da área de *System Dynamics*; e d) validação da solução, por meio de testes em laboratório e análise do comportamento histórico, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade, bem como por meio da simulação de um experimento, utilizando-se, para isso, 2 (dois) cenários para cada uma das 2 (duas) espécies do gênero lixo eletrônico objetos deste estudo (computadores e impressoras).

Os cenários utilizados para a validação do modelo foram gerados a partir de análises nas quais foram usados dados históricos relativos às compras e às baixas dos equipamentos eletrônicos objetos deste estudo – computadores e impressoras (jato de tinta e à *laser*), de 2005 a 2014 (10 anos), de uma Instituição Federal de Ensino Superior (IFES), situada no Estado do Rio Grande Sul. Ademais, também contou com a participação de gestores e pesquisadores da área de resíduos sólidos, mais especificamente lixo eletrônico.

2.1. Formulação da Hipótese Dinâmica

Segundo Silva (2006), a hipótese dinâmica aborda a teoria do problema, analisando o seu comportamento e observando quais variáveis fazem parte do sistema. Neste artigo incorporaram-se 3 (três) variáveis básicas: variação da quantidade de equipamentos incorporados à instituição, principalmente por meio de compras; variação da quantidade de equipamentos considerados lixo eletrônico, relacionada diretamente à variável “*qtdbaixa*” por ano; e a taxa de reuso anual dos equipamentos inicialmente considerados lixo eletrônico.

A primeira delas (relacionada às compras) entendeu-se como a de maior dificuldade de controle, visto que a quantidade de material comprado anualmente não apresenta uma tendência ou comportamento constante. Assim, para projetar os cenários futuros, de 2015 a 2019, adotou-se um valor fixo, determinado pela média aritmética do ano de 2005 a 2014.

Com relação a se considerar os equipamentos eletrônicos como destinados à baixa, ou seja, como lixo eletrônico, a variável “*qtdbaixa*” adota o lapso temporal de 5 (anos) da compra para tal. Isso, haja vista, o prazo de vida útil admissível para fins de depreciação, estabelecido pela Secretaria da Receita Federal do Brasil (SRFB) e entrevistas com gestores da Instituição Federal de Ensino Superior (IFES) na qual se realizou a pesquisa e, ainda, conforme sugerido por Silva (2013).

Referente à taxa de reuso, para esta variável foram estipulados 2 (dois) percentuais distintos, com vistas a verificar a sua interferência na quantidade estocada de lixo eletrônico sem qualquer destinação, o que vem a ser um grande problema para a organização na qual se propôs esta pesquisa.

O objetivo dessa etapa é formular uma hipótese que explique a dinâmica como consequência da estrutura interna do sistema por meio da interação entre as variáveis e os agentes representados no modelo, incluindo regras de decisão (STRAUSS, 2010). Assim, a hipótese dinâmica do modelo de *Systems Dynamics* deste trabalho é definida a seguir:

A variação da taxa de reuso (reuso) dos equipamentos eletrônicos destinados à baixa (lixo eletrônico), em uma Instituição Federal de Ensino Superior (IFES), associada à quantidade de itens destinados à baixa, após 5 (cinco) anos da compra, possui influência na quantidade total de lixo eletrônico armazenado sem qualquer destinação.

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional de sistemas, segundo Kelton, Sadowski e Sadowski (1998), consiste na utilização de um conjunto de métodos e técnicas matemáticas, com o objetivo de imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente utilizando computadores e softwares.

A utilização 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 compreensão e comunicação sobre os modelos construídos (PIDD, 1984).

Uma das técnicas utilizadas para a simulação computacional é a metodologia de *System Dynamics*, a qual foi utilizada para a elaboração desse trabalho.

3.1 *System Dynamics*

Uma das principais etapas de um estudo de simulação consiste na criação de um modelo lógico. A metodologia *System Dynamics* foi desenvolvida pelo engenheiro Jay Forrester, do Instituto Tecnológico de Massachussets, na década de 1950 (SIMONETO; LOBER, 2014). A utilização do *System Dynamics* permite o estudo do comportamento dos sistemas ao longo do tempo, podendo aumentar ou diminuir as entradas e saídas de produtos no sistema, alterando as consequências das decisões (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005). Isso acontece como se fosse um conjunto de elementos que interagem continuamente produzindo variações. Através do uso da simulação, pode-se imitar o comportamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (LAW; KELTON, 1991).

O conceito fundamental do *System Dynamics* está em entender como os objetos de um sistema interagem entre si, pois tanto os objetos quanto as pessoas em um sistema interagem através de laços de realimentação, onde uma mudança em uma variável afeta as outras variáveis.

Forrester (1989) mencionou que tendências do SD 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.

De acordo com Simoneto e Lobler (2014), um modelo de *System Dynamics* pode ser interpretado como a estrutura resultante da interação de políticas. Essa estrutura é formada por dois componentes principais, que são os estoques e os fluxos. Os estoques representam as variáveis que são acumuladas e os fluxos representam as funções de decisão ou políticas de um sistema.

3.1.1 Componentes do Modelo

Em *System Dynamics*, um modelo é construído com basicamente quatro componentes, quais sejam: a) estoques; b) fluxos; c) auxiliares e d) conectores.

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 e WINEBRAKE, 2000). Tem como principal função fornecer uma visão de como o sistema se encontra em qualquer instante de tempo. Ainda, mudanças no estoque não são instantâneas, elas demandam certo tempo, e ocorrem devido à ação dos fluxos.

Por sua vez, os fluxos são variáveis de ação e podem aumentar ou diminuir o volume dos estoques, os alterando.

Já, os auxiliares servem para formular os dados com o intuito de definir as equações dos fluxos. Eles têm como função combinar, por meio de operações algébricas, fluxos, estoques e outros auxiliares. Ainda, 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 são os elementos que representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. Outrossim, são essas inter-relações que estabelecem as ligações entre os componentes que formarão a expressão algébrica (DEATON e WINEBRAKE, 2000). A Figura 1 apresenta cada um dos componentes de um modelo de *System Dynamics*.

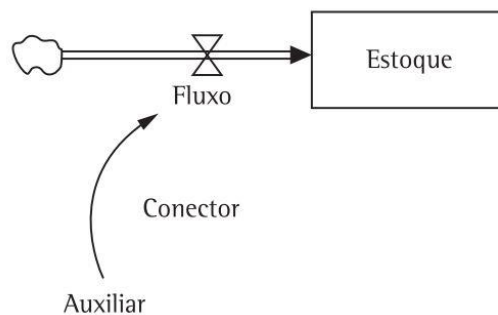


Figura 1: Comportamento de um modelo de *System Dynamics*.
 Fonte: Simonetto e Löbler (2014).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

4.1 Lixo Eletrônico

As últimas cinco décadas foram marcadas por uma escalada crescente no uso da tecnologia da informação (TI) em todas as esferas da atividade humana, sendo que hoje em dia, a tecnologia torna-se parte indissociável da vida das pessoas e organizações. A TI não só trouxe mais eficiência às operações, como viabilizou modelos de negócios anteriormente inimagináveis. Na vida pessoal, trouxe mais facilidade para realização de tarefas corriqueiras do dia a dia. Proporciona ainda a quebra de fronteiras, crescimento econômico, inclusão digital, ampliação e integração de mercados, etc. (JAYO; VALENTE, 2010).

Segundo Siqueira (2009), o desenvolvimento e a difusão abrangente da TI é hoje a principal fonte de transmissão e aceleração do progresso técnico. No entanto, a atenção não se restringe apenas aos benefícios que a TI proporciona. Nos últimos anos, o debate se volta a uma temática que até então vinha recebendo pouca atenção, a preocupação com o impacto ambiental do uso intensivo de tecnologia, que acarreta em toneladas de lixo eletrônico e consumo energético em todo o mundo (JAYO; VALENTE, 2010).

Considera-se lixo eletrônico os resíduos de rápida obsolescência de equipamentos eletrônicos, que incluem computadores, eletrodomésticos, entre outros dispositivos (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, DVD, telefones celulares, tocadores de mp3 e equipamentos esportivos e de lazer).

O lixo eletrônico tem ganho crescente atenção nos últimos 10 anos (STEP, 2015), em grande parte devido ao fato de que é uma, senão a maior, fonte de crescimento de resíduos sólidos em todo o mundo (PERKINS, 2014). Considerando que muitos outros fluxos de resíduos estão em declínio, o lixo eletrônico continua a crescer a uma taxa em torno de 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 cresce no mundo em um ritmo alarmante, em torno de 3 a 5% ao ano (WIBOWO e DENG, 2015) não mostrando nenhum sinal de diminuição.

A ONU calcula que no mundo são descartados anualmente cerca de 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico. Conforme o relatório STEP (2009), estima-se que o Brasil produz a maior quantidade de lixo eletrônico da América Latina. De acordo com STEP

(2014), é produzido por ano cerca de 7 kg de lixo por pessoa. Contudo, 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 LE 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. A questão torna-se particularmente preocupante se considerarmos que os equipamentos eletrônicos, além de se caracterizarem pela rápida obsolescência, possuem em sua composição substâncias altamente tóxicas 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 05 de agosto de 2010 a Lei Federal nº 12.305/10, referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos, que obriga o destino adequado a esses resíduos.

“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).

4.2 Reciclagem, Reuso e Logística Reversa

A preocupação da sociedade com o ambiente nos últimos anos faz com que consumidores e empresas se inquietem com a situação do descarte dos resíduos. 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, 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. 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 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 através do reuso, 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 esses equipamentos.

A logística reversa é definida como fluxo ou movimento de produtos, materiais e embalagens na direção oposta à tradicional, com o objetivo de criar ou recapturar valor, ou simplesmente, descartá-los corretamente (TIBBEN-LEMBKE e ROGERS, 2002). Para Rogers e Tibben-Lembke (1999), a logística reversa 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”.

Em um país como o Brasil, medir a reciclagem é um trabalho complexo, visto o grau de informalidade do mercado, a inexistência de dados oficiais consistentes e abrangentes, a dimensão territorial e suas diferentes realidades, além da diversidade de atores que participam desse mercado. Contudo, o país possui o maior centro público de descarte e reuso de lixo eletrônico da América Latina, ele funciona em um galpão de 450 metros quadrados, na Universidade de São Paulo (USP). Esse programa de responsabilidade socioambiental intitula-se Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR). Trata-se de um projeto pioneiro de tratamento de lixo eletrônico em órgão público e em Instituições de Ensino Superior. Inaugurado em 2009, esse programa tem como objetivo implementar 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, os quais passam por uma categorização, triagem e destinação final, impossibilitando o descarte na natureza e possibilitando o seu reaproveitamento na cadeia produtiva.

Na Instituição de Ensino Superior pesquisada 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 IES possa estabelecer práticas de sustentabilidade e racionalização de gastos e processos. Um dos objetivos da PLS é o destino correto dos resíduos da IES. No Quadro 1, está resumido esse objetivo.

Metas	Ações	Detalhamento de Implementação das Ações	Indicadores
Aumentar em 50% a destinação correta dos resíduos gerados na IES, com o mapeamento dos contêineres e a criação de rotinas para o recolhimento dos lixos recicláveis nos setores.	Destinação e formas de acondicionamento corretas dos resíduos.	Utilizar sacos coletores com as cores correspondentes ao tipo de lixo.	Quantidade de resíduos gerados (kg).
	Mapeamento dos contêineres e criação de rotinas para o recolhimento dos lixos recicláveis nos setores.	Realizar levantamento sobre a geração de resíduos nas unidades e em toda a IES.	Quantidade de material reciclável destinado (kg).
	Padronização dos contêineres coletores de resíduos de acordo com as normas do CONAMA.	Instalar nos setores coletores e contêineres com a 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 PROINFRA.	
Fomentar a Logística Reversa – LR.	Recolhimento dos bens inservíveis para o processo de reutilização.	Implementar o sistema de LR nas contratações de pneus, lâmpadas, pilhas, baterias, óleos, produtos eletroeletrônicos .	Quantidade anual de bens inservíveis.

Quadro 1: Objetivo da PLS de Destinar Corretamente os Resíduos.

Fonte: Adaptada da IES.

Além de tentar implantar de forma eficaz a PLS, a IES necessita se adequar às normas impostas pelo país. No Brasil, 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, dispõe sobre as especificações padrão de bens de TI, os quais se enquadram no âmbito da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dá outras Providências.

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

5 Variáveis e o Modelo de Simulação

Atualmente, verifica-se a crescente geração de resíduos sólidos pela população, logo, demandando que alternativas ao melhor aproveitamento dos resíduos sejam criadas e executadas. Nesse aspecto, a reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos surgem como alternativas viáveis, já que no momento em que o material é reciclado ou reaproveitado ele não polui o meio ambiente e não utiliza recursos naturais em excesso na sua transformação (LOUREDO, 2015).

Observa-se que a reciclagem é um termo utilizado para indicar o reaproveitamento ou a reutilização de um material que por algum motivo fora rejeitado. A partir da reciclagem pode-se diminuir a quantidade de lixo que se descarta na natureza e a quantidade de energia e de matéria-prima necessária para a produção de novos produtos. Assim, é extremamente importante que as pessoas e as organizações se conscientizem em relação aos impactos que causam ao meio ambiente, mas também que promovam ações práticas para a redução desse impacto (LOUREDO, 2015).

Conforme Jayo e Valente (2010), nos últimos anos, o debate se voltou à preocupação com o impacto ambiental resultante do uso intensivo de tecnologia, o qual produz toneladas de lixo eletrônico em todo o mundo. Considera-se lixo eletrônico os equipamentos eletroeletrônicos de rápida obsolescência, então descartados, tais como: computadores, impressoras, eletrodomésticos, entre outros dispositivos (GUERIN, 2008).

Nesse contexto, a reciclagem pode ser considerada a alternativa mais viável para o problema do lixo eletrônico e que o processo de reciclagem também pode ocorrer por meio do reuso, da recuperação de resíduos ou de seus constituintes, verificou-se relevante desenvolver uma pesquisa relacionada ao tema, no caso, em uma Instituição de Ensino Superior. Ademais, uma vantagem do reuso é que ele fornece equipamentos e algumas peças de reposição para equipamentos da própria instituição, além de beneficiar projetos sociais, o que pode favorecer comunidades que não teriam acesso a esses equipamentos (SILVA, 2013).

Neste estudo, procura-se utilizar no modelo, o conceito da reciclagem, mais especificamente, do reuso, de equipamentos eletrônicos, quais sejam: a) computadores; e b) impressoras. Isso, pois, ao reutilizar, amplia-se a vida útil do produto, além de economizar a extração de matérias-primas para a fabricação de novos produtos (LOUREDO, 2015).

Assim, tendo por base a importância da reciclagem, mais especificamente, do reuso, para a preservação do meio-ambiente e os seus ganhos ambientais associados, nesse trabalho buscou-se o desenvolvimento de um modelo de simulação que permita tanto aos gestores, da área de lixo eletrônico, avaliarem políticas de reciclagem/reaproveitamento dos equipamentos eletrônicos de uma IES, visando ao desenvolvimento sustentável da instituição.

No modelo, será avaliada, futuramente, a quantidade de lixo eletrônico gerada, sem ou com taxa de reuso. O modelo foi desenvolvido com o intuito de simplificar a interação usuário-computador para que análises do tipo “o que se?” (*what-if?*), comuns em modelos de simulação, os quais sejam de rápida e simples execução.

Para a definição das variáveis do modelo de simulação apresentado nas Figuras 2 e 3 foram realizadas entrevistas com gestores e pesquisadores da área, onde se constatou toda a sistemática do problema estudado. Além disso, foram consultados trabalhos acadêmicos e

governamentais relacionados à área de resíduos e de lixo eletrônico. As variáveis selecionadas, bem como as suas inter-relações, que influenciam na 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 (vinte) anos, sendo que os 10 (dez) primeiros anos correspondem às variações provenientes de quantidades históricas de compras, de 2005 a 2014. Agora, os 10 (dez) próximos anos, de 2015 a 2024, correspondem às variações futuras provenientes da quantidade média de compras (derivada da média aritmética histórica) e provenientes da taxa de reuso do lixo eletrônico (“**reuso**”). Ela encontra-se representada na Equação 1 do modelo de equações apresentado no Quadro 2;
- A variável-estoque “**lixo eletrônico**” fora obtida por meio da diferença entre o que seria descartado como lixo eletrônico, após 5 (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**”). A variável é descrita na Equação 2 do modelo de equações apresentado no Quadro 2;
- A variável-auxiliar “**compras**” traz a variação relativa à quantidade de compras realizada pela organização. Os 10 (dez) primeiros anos apresentam quantitativos históricos. Agora os 10 (dez) anos seguintes apresentam projeções futuras, quantidade fixa derivada da média aritmética dos quantitativos históricos. A variável não apresenta equação.
- A variável-auxiliar “**qtdbaixa**” traz o quantitativo de itens que, após 5 (cinco) anos da compra, serão considerados lixo eletrônico. A variável não apresenta equação;
- A 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**”. A variável encontra-se concebida na Equação 3 do modelo de equações apresentado no Quadro 2; e
- A 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 do que fora considerado lixo eletrônico. Por meio da variação deste índice é que se observará o comportamento (cenário) da variável-estoque “**lixo eletrônico**” durante os anos. A variável não apresenta equação, mas sim um índice, a ser determinado, para a observação/análise dos cenários.

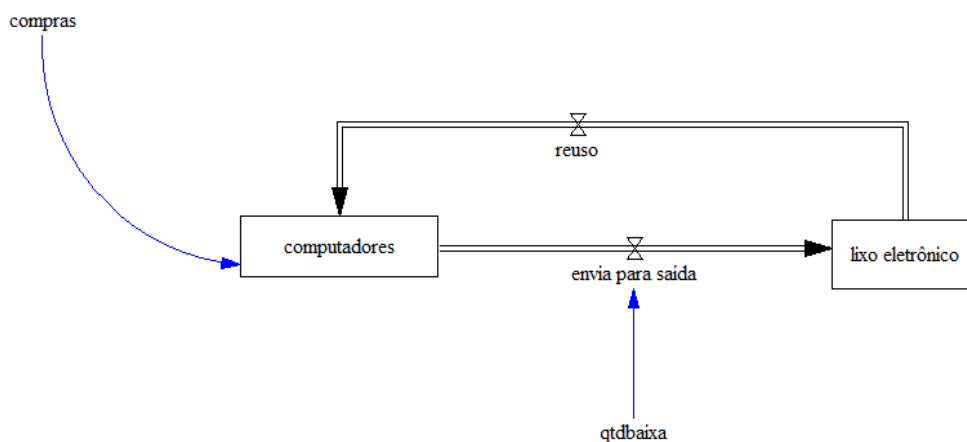


Figura 2: Modelo de Simulação Desenvolvido (computadores).

Fonte: Elaborado pelos autores.

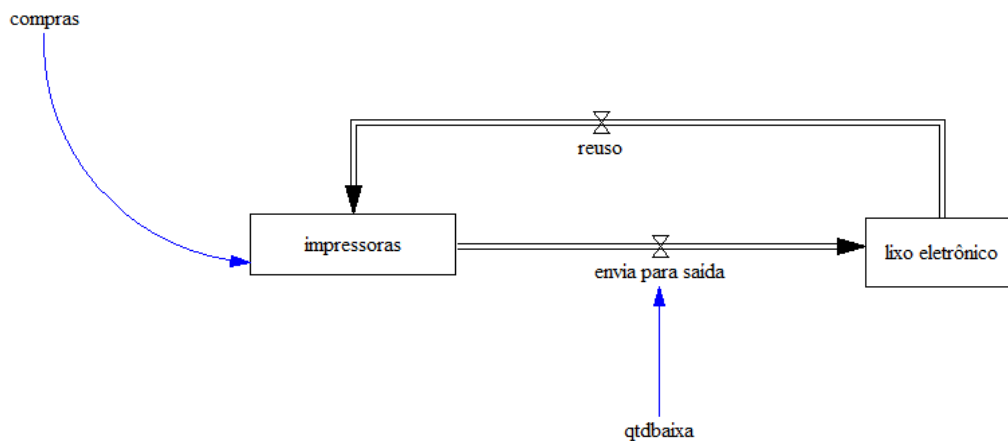


Figura 3: Modelo de Simulação Desenvolvido (impressoras).
 Fonte: Elaborado pelos autores.

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

Quadro 2: Formulação Matemática do Modelo de Simulação Desenvolvido.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

Ainda, vale informar que os quantitativos históricos relativos às compras (variável-auxiliar “*compras*”) foram obtidos juntos à instituição que fora utilizada para o estudo, no caso, uma Instituição de Ensino Superior (IES). Estes dados são apresentados no Quadro 3.

Variável-Auxiliar “ <i>compras</i> ” (computadores)		Variável-Auxiliar “ <i>compras</i> ” (impressoras)	
Ano	Quantidade	Ano	Quantidade
0 (2005)	310	0 (2005)	135
1 (2006)	406	1 (2006)	160
2 (2007)	1311	2 (2007)	317
3 (2008)	1039	3 (2008)	132
4 (2009)	1901	4 (2009)	128
5 (2010)	1467	5 (2010)	317
6 (2011)	978	6 (2011)	86
7 (2012)	1200	7 (2012)	187
8 (2013)	1116	8 (2013)	156
9 (2014)	561	9 (2014)	561
10 – 19 (2015 - 2024)	1029 (média aritmética)	10 – 19 (2015 - 2024)	175 (média aritmética)

Quadro 3: Valores Históricos de Compras e Média Aritmética.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

A seguir segue a como ilustração a evolução histórica das compras de computadores e impressoras de 2005 (ano 0) a 2014 (ano 9) (Gráfico 1 e 2).

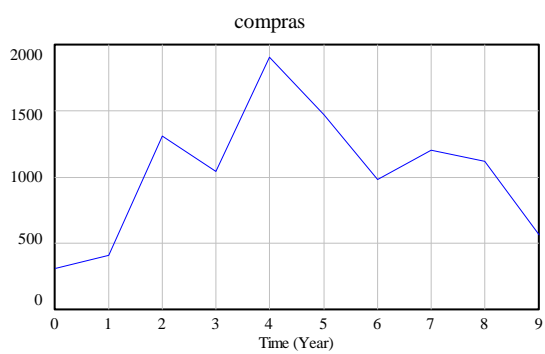


Gráfico 1: Evolução Histórica das compras de computadores

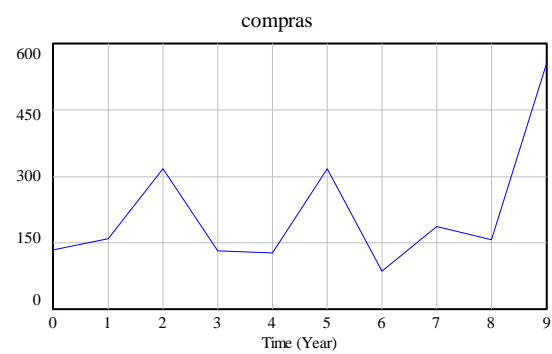


Gráfico 2: Evolução Histórica das compras de impressoras

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outrossim, seguem os valores iniciais das variáveis-estoque, os quais são os quantitativos que já constavam como considerados compras ou lixo eletrônico:

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

Quadro 4: Valores Iniciais das Variáveis-Estoque.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ademais, quanto à variável-fluxo “reuso”, fora utilizado o índice de 0% (zero por cento), que é o que atualmente se observa na instituição, e a taxa de 25% (vinte e cinco por cento) como meta a ser alcançada.

6 VALIDAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO

O modelo foi validado em diferentes etapas, sendo que inicialmente foram utilizadas informações obtidas em artigos científicos, dissertações e teses, além de entrevistas com os gestores do ambiente simulado e pesquisadores da área de resíduos sólidos, mais especificamente lixo eletrônico. Assim, fica caracterizada a validação nominal, visto que foram utilizados especialistas para auxiliar na definição das variáveis relevantes a serem empregadas na modelagem proposta.

Em seguida, na segunda etapa de validação, referente à implementação 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 à Instituição de Ensino Superior (IES) objeto deste estudo, além de informações relativas ao reuso do lixo eletrônico, obtidas junto aos gestores da organização e a pesquisas da área, com o objetivo de verificar a integração entre todas as variáveis componentes do modelo, bem como a análise dos resultados gerados. Isso, pois serão avaliadas as saídas produzidas pelo modelo de simulação a partir de dados reais.

Na última fase da validação, para a construção do experimento, foram utilizados dados reais referentes às compras (computadores e impressoras). Outrossim, quanto às taxas de reuso, estas foram lastreadas na realidade atual da organização (0% - zero por cento) e em informações de estudos da área para a projeção de cenário (25% - vinte e cinco por cento). Quanto às projeções futuras referentes às compras, valeu-se da média aritmética dos dados históricos da instituição disponíveis relativos aos próximos 10 (dez) anos. Assim, serão gerados cenários a serem simulados no modelo. O detalhamento de cada cenário simulado será apresentado em seguida.

6.1 Cenários Simulados no Modelo

Para a validação e experimentação do modelo de simulação desenvolvido foram gerados os seguintes cenários.

6.1.1 Cenário Atual

Para a representação deste cenário foram utilizados os dados reais de compra de computadores e impressoras observados nos anos de 2005 a 2014 (Ano 0 a 9), proveniente de relatório da instituição, sobre a situação do material (computadores e impressoras) por período. Estes dados são apresentados para proporcionar maior compreensão em relação à situação do lixo eletrônico na instituição estudada, sendo que a partir deles foram então projetados dois cenários futuros, um para cada modelo simulado (um para computadores e um para impressoras). Vale trazer, ainda, que atualmente na organização objeto deste estudo não possui qualquer programa para destinação do lixo eletrônico gerado pela mesma, o que acaba trazendo diversos problemas ambientais e de armazenamento.

Ressalta-se que as informações expostas nos gráficos 1 e 2 da seção 5 foram apresentados com o intuito de se ilustrar a situação histórica das compras de computadores e impressoras da instituição analisada. Assim, estes panoramas foram exibidos separadamente a título de informação e, portanto, não serão utilizados para fins de análise de cenário.

6.1.2. Cenário Futuro sem Variação das Quantidades e sem Taxa de Reuso

Para a simulação deste cenário foram considerados os dados reais de compra e de baixa de computadores e impressoras observados nos anos 2005 a 2014, porém, a partir destes dados, calculou-se então uma média de compra para os próximos 10 anos, sendo assim, esta média permaneceu a mesma por todo o período simulado. Assim, a data 0 (zero) dos gráficos apresentados corresponde ao ano 2015 e a data 9 (nove) corresponde ao ano 2024. Ainda, considerou-se a vida útil destes equipamentos como de 5 (cinco) anos, conforme apontado por Silva (2013).

6.1.3. Cenário Futuro sem Variação das Quantidades e com Taxa de Reuso

Para a simulação deste cenário foram utilizados os mesmos dados do cenário 6.1.2, porém, acrescentou-se uma taxa anual de reuso de 25% (vinte e cinco por cento) para os computadores e impressoras, seguindo a mesma linha de SECTI (2010), a qual expõe que, em média, para fazer um computador bom para uso, são usadas peças de três ou quatro.

6.2 Experimento

Após a definição dos cenários, foram executadas as simulações. Como citado anteriormente, os dados utilizados nos cenários foram de uma Instituição de Ensino Superior (IES) que não possui centro de reciclagem ou qualquer outra forma de tratamento e/ou destinação do lixo eletrônico. O horizonte de tempo simulado no experimento fora de 10 (dez) anos. Para a execução das simulações fora utilizado o simulador Vensim[®] PLE (VENTANA SYSTEMS, 2015), em uma estação de trabalho com Processador Intel Core i3 (M380) e 4 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação dos cenários fora da ordem de milionésimos de segundo. Os resultados obtidos no experimento realizado são apresentados na subseção 6.3.

6.3 Resultados Obtidos

Com a realização do experimento, resultados relativos à geração de lixo eletrônico foram obtidos. Primeiramente, quanto à geração de lixo eletrônico (e-lixo) relacionado a computadores, verificou-se que o melhor resultado encontrado foi na segunda projeção, ou

seja, com a utilização de uma taxa de reuso de 25% (vinte e cinco por cento), conforme sugeriu SECTI (2010). Estas conclusões empíricas podem ser verificadas na Figura 5, a qual se encontra na sequência.

Pode-se visualizar na Figura 5 que a produção de lixo eletrônico gerada no Cenário A, sem taxa de reuso, supera a quantidade de 10.000 (dez mil) computadores. Já, no Cenário B, com taxa de reuso de 25% (vinte e cinco por cento), esta quantidade fica um pouco abaixo de 5.000 (cinco mil) computadores, sendo que o quantitativo de lixo gerado se mostra mais estável. Pode-se observar ainda que, no ano 9 (nove), equivalente ao ano de 2024, a quantidade de e-lixo observada no Cenário A é mais do que o dobro da quantidade constatada no Cenário B.

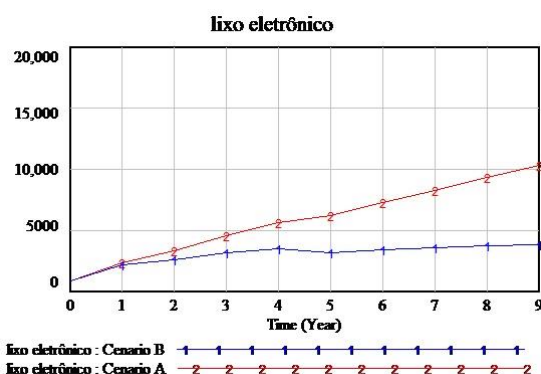


Figura 4: Resultado sobre Geração de Lixo Eletrônico – Computadores.
Fonte: Elaborado pelos autores.

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% (vinte e cinco por cento), conforme sugeriu SECTI (2010). Estas constatações empíricas podem ser verificadas na Figura 6.

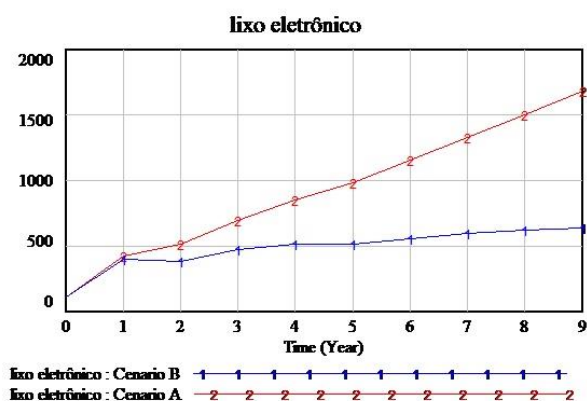


Figura 5: Resultado sobre Geração de Lixo Eletrônico – Impressoras.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se visualizar na Figura 6 que a produção de lixo eletrônico gerada no Cenário A supera a quantidade de 1.500 (um mil e quinhentas) impressoras. Já no Cenário B, esta quantidade encontra-se um pouco acima de 500 (quinhentas) impressoras. Pode-se observar também que, em ambos os cenários, a quantidade de lixo eletrônico aumenta, porém, o e-lixo gerado no primeiro cenário (Cenário A) é praticamente o triplo do gerado no segundo (Cenário B). Ainda, no Cenário A, há um aumento mais acelerado da quantidade de lixo eletrônico.

Com a utilização do modelo, pode-se concluir que, com uma simples adoção de uma taxa de reuso de 25% (vinte e cinco por cento), o quantitativo de lixo eletrônico relacionado a computadores e a impressoras reduz significativamente, cerca de 1/3 (um terço) quanto a impressoras, e mais do que a metade no tocante aos computadores. Assim, a hipótese dinâmica deste estudo fora verificada. Desta 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.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo do trabalho foi apresentar o desenvolvimento, a validação e a utilização de um modelo de simulação computacional para auxiliar os gestores das mais variadas instituições na tomada de decisão sobre geração e destino de resíduos eletrônicos, sendo que este modelo preocupou-se em simular a situação considerando o reuso e o não-reuso destes equipamentos.

Para o desenvolvimento do modelo foram utilizadas variáveis como quantidades históricas de compras, quantidade média de compra, para projeção dos Cenários A e B (derivada da média aritmética histórica), e quantidade de baixa (quantitativo de itens que, após 5 (cinco) anos da compra, são considerados lixo eletrônico). A partir disso, o sistema foi capaz de estimar a quantidade de lixo eletrônico a ser gerado sem taxa de reuso e com taxa de reuso.

O modelo foi validado e avaliado utilizando-se dados de uma Instituição de Ensino Superior do estado do Rio Grande do Sul. Por meio destes 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 destes equipamentos. Ainda, os resultados apurados podem subsidiar futuras campanhas de conscientização. Neste artigo, sugeriu-se o reuso de computadores e impressoras. Porém, ressalta-se, ainda, que a logística reversa também, por ventura, pode ser considerada como outra forma de destinação dentro do conceito de reciclagem.

Lembra-se, ainda, que a instituição analisada possui um Plano de Logística Sustentável, sendo que entre suas metas estão: a) a construção de um Centro de Gerenciamento de Resíduos; b) o fomento à logística reversa; e c) aumentar em 50% a destinação correta dos resíduos gerados.

No artigo foram apresentados cenários distintos quanto à geração de lixo eletrônico de computadores e de impressoras. A situação atual fora ilustrada para proporcionar maior compreensão em relação ao lixo eletrônico, sendo que é a partir deste que foram projetados os cenários futuros. Os resultados gerados foram apresentados 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% (vinte e cinco por cento), o quantitativo de lixo eletrônico, relacionado a computadores e a impressoras, reduz-se significativamente. Assim, a hipótese dinâmica deste estudo fora verificada. Desta forma, recomenda-se o estímulo à prática do reuso, acompanhada de ações de conscientização e de campanhas de divulgação a toda a comunidade acadêmica.

Para trabalhos futuros, sugere-se incluir outras variáveis, tais como: logística reversa. Outra proposta a ser considerada seria estudar a viabilidade da construção de um centro de reciclagem de resíduos eletrônicos na instituição, tal como acontece na USP (CEDIR, 215) e, ainda, como já é apontado no Plano de Logística Sustentável 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 só políticas de sustentabilidade, mas também, ações diversas gerenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**. 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**. v. 114, p. 133-149, 2000.

DAELLENBACH, H. G.; McNICKLE, D. C. **Decision making through systems thinking**. Palgrave Macmillan, 2005.

DEATON, M. L.; WINEBRAKE, J. J. **Dynamic Modelling of Environmental Systems**. 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), V CONNEPI – 2010.

FORRESTER, J. W. The Beginning of System Dynamics. Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society. Stuttgart, Germany Jul. 1989.

GUERIN, M. **Consciência Ecológica: reduzir, reusar e reciclar**. Reportagem publicada na Folha de Londrina em 30 de abril de 2008.

JAYO, Martin; VALENTE, Rafael. **Por uma TI mais Verde**. Especial: Energia e Sustentabilidade, GV Executivo. Vol. 9, n. 1. Jan./jun., 2010.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 2 ed. McGraw-Hill, 1991.

LEPAWSKY, J. The changing geography of global trade in electronic discards: time to rethink the e-waste problem. **The Geographical Journal**. v. 181, n. 2, p. 147–159, June 2015.

LOUREDO, Paula. **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. Resíduo eletrônico: um desafio para o desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos. Universidade tecnológica Federal de Paraná. São Paulo, 2011.

PERKINS, D. N.; DRISSE, M. N. B.; NXELE, T.; SLY, P. D. E-Waste: A Global Hazard. Icahn School of Medicine at Mount Sinai. **Annals of Global Health**. v. 80, p. 286-295, 2014.

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. NY: John Wiley & Sons, Inc., 1984.

ROGERS, D S.; TIBBEN-LEMBKE, R S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. University of Nevada, Reno - Center for Logistics Management. Disponível em: <<http://equinox.unr.edu/homepage/logis/reverse.pdf>. Acesso em 30 jun. 2015.

SECTI - Secretaria Estadual de Ciência e Tecnologia e Inovação. **Centro de Recondicionamento dá nova vida a equipamentos**. 1 jun. 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, 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2006.

SILVA, et. al. **O Descarte de Componentes Eletrônicos como Oportunidade Empresarial**. In: REVISTA RETC – Edição 11^a, revista n° 3, outubro de 2012.

SILVA, Beloni Gomes. Gestão dos Resíduos Eletrônicos da UFSM: Viabilidade e implementação de uma Política de Reciclagem. **Dissertação de Mestrado**. UFSM: 2013.

SIMON, H. A. Prediction and Prescription in Systems Modeling. **Operations Research**. v. 38, p. 7-14, 1990.

SIMONETTO, Eugênio de Oliveira; LÖBLER, Mauri Leodir. 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, jan/mar, 2014.

SIQUEIRA, H. S. G. Globalização - a globalização sob a ótica da acumulação flexível. **Revista Sociais e Humanas do Centro de Ciências Sociais e Humanas da UFSM**. v. 22, Edição Especial, ago. 2009

STEP. Solving the E-waste Problem. E-waste Prevention, Take-back System Design and Policy Approaches, 2015.

STRAUS, L. M. Um Modelo em Dinâmica de Sistemas para o Ensino Superior. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

TIBBEN-LEMBKE, R. S., ROGERS, D. S. **Differences between forward and reverse logistics in a retail environment**. Supply Chain Management: An International Journal, 2002.

WIBOWO, S.; DENG. H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. **Waste Management Journal Elsevier**. v.40, p. 127–135, 2015.