



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

de Oliveira Simonetto, Eugênio; Putnik, Goran; Oliveira Rodrigues, Glauco; Alves, Cátia;
de Castro, Hélio

Um modelo de dinâmica de sistemas para avaliação do reaproveitamento de resíduos
eletrônicos na remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior

Exacta, vol. 14, núm. 3, 2016, pp. 385-402

Universidade Nove de Julho

São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81047687005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Um modelo de dinâmica de sistemas para avaliação do reaproveitamento de resíduos eletrônicos na remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior

A system dynamics model for evaluating electronic waste reuse in the remanufacturing of computers at a higher learning institution

Eugênio de Oliveira Simonetto

Doutor em Administração pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Professor do Departamento de Ciências Administrativas da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.
Santa Maria, RS [Brasil]
eosimonetto@gmail.com

Goran Putnik

Agregação pela Universidade do Minho, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Minho.
Guimarães, [Portugal]
putnikgd@dps.uminho.pt

Glauco Oliveira Rodrigues

Graduado em Redes de Computadores pela Universidade Federal de Santa Maria, Mestrando em Administração pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.
Santa Maria, RS [Brasil]

Cátia Alves

Mestre em Engenharia e Gestão Industrial pela Universidade do Minho, Doutoranda em Produção e Sistemas pela Universidade do Minho.
Guimarães, [Portugal]
catia.alves@dps.uminho.pt

Hélio de Castro

Mestre em Engenharia e Gestão Industrial pela Universidade do Minho, Doutoranda em Produção e Sistemas pela Universidade do Minho.
Guimarães, [Portugal]
heliodecastro@gmail.com

Resumo

O uso das Tecnologias da Informação envolve uma crescente geração de resíduos eletrônicos, pois devido à rápida inovação tecnológica estes, em um curto espaço temporal, tornam-se obsoletos e têm seu ciclo de vida reduzido. Este artigo apresenta o desenvolvimento de modelos de simulação para avaliação dos impactos ambientais e financeiros ocasionados pela extensão do ciclo de vida de computadores pessoais por meio de seu reuso e remanufatura. Para a modelagem do sistema, foi utilizada a metodologia de Dinâmica de Sistemas mediante uso do simulador Vensim. Para a experimentação, verificação e validação do modelo, foram definidos dois cenários: otimista, com altas taxas de reutilização do resíduo; e moderado, com taxas menores de reutilização. Na concepção do modelo, optou-se pela construção deste em submodelos, de modo a facilitar a sua experimentação e análise. Assim, foram desenvolvidos três submodelos, os quais foram denominados: Aquisição/Descarte, PC Remanufaturado e Avaliação dos Benefícios.

Palavras-chave: Dinâmica de sistemas. Lixo Eletrônico. Modelagem de sistemas. Remanufatura de computadores. Simulação computacional.

Abstract

The use of information technology (IT) has lead to an increased generation of electronic waste because the fast pace of technology innovation creates product obsolescence in a short period of time, thereby resulting in life cycle reduction. This paper presents the development of simulation models for the evaluation of environmental and financial impact of the extension of the life cycle of personal computers by their reuse and remanufacturing. For the system modeling, system dynamics methodology was used, implemented through Vensim simulation software. For experimentation, verification, and validation, two scenarios were defined: an optimist one (with high rates of waste reuse) and a conservative one (with lower rates of waste reuse). To facilitate the experimentation and analysis, the model design comprised three sub-models, with the following designations: Acquisition/Waste, Remanufactured PC, and Benefits Evaluation.

Key words: Computer simulation. Computer remanufacturing. E-waste. System dynamics. Systems modelling.

1 Introdução

O uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) no cotidiano das pessoas é um fato real e inquestionável, haja vista a grande utilização de computadores pessoais (*personal computer* – PCs e *notebooks*), dispositivos portáteis (*smartphones* e *tablets*), impressoras até os dispositivos de comunicação (fibra ótica, cabos de comunicação e equipamentos), nos dias atuais. Devido às constantes mudanças ocasionadas pela evolução tecnológica, essas TICs tornam-se obsoletas muito rapidamente e são descartadas pelos seus usuários, assim, gerando resíduos eletrônicos (*e-waste*). Ferrer (1997) afirma que os computadores pessoais e as impressoras são, dos bens de consumo duráveis, os que possuem menor ciclo de vida; porém, seus componentes podem ter seus ciclos de vida estendidos. O aumento da vida útil das tecnologias bem como a redução do consumo energético dessas são os principais objetivos das pesquisas em Tecnologia da Informação Verde (TI Verde ou Green IT).

Desse modo, o tratamento correto dos resíduos em geral encontra-se entre as questões mais importantes para a manutenção da qualidade do meio ambiente no mundo, principalmente, para alcançar um desenvolvimento sustentável em todos os países (ZUTSHI; SOHAL, 2002). Apesar da grande preocupação da comunidade internacional relativa a esse assunto, o que acontece, ainda hoje na maioria das vezes, são práticas que podem comprometer o futuro das próximas gerações. E os resíduos gerados pelos dispositivos eletrônicos são um dos tipos que mais preocupam os gestores ambientais, pois são extremamente poluentes e nocivos à saúde humana devido à sua alta toxicidade.

Em razão da gama de problemas que o tratamento inadequado dos resíduos causa, a gestão destes passou a ser um tópico que vem cada vez mais atraindo a atenção dos investigadores na área de Modelagem e Sistemas nos últimos vin-

te anos (HUANG et al., 1998; SIMONETTO; BORENSTEIN, 2007). Ainda são escassos os trabalhos publicados sobre o desenvolvimento de modelos computacionais de apoio ao processo decisório associados às práticas de TI Verde. As pesquisas encontradas referem-se a análises de melhores práticas no uso de TICs em um Setor de Tecnologia da Informação (KROTH et al., 2015). Em outros estudos, analisa-se a questão da eficiência energética e dos valores de mercado dos computadores e telefones móveis remanufaturados, assim, comparando-os com os produtos novos em tais critérios (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2009, 2012; SAHNI et al., 2010).

Com base nas descrições anteriores e visando a minimizar o impacto dos acelerados ritmos de industrialização, poluição e exploração dos recursos naturais ocasionados pelos dispositivos eletrônicos, propor-se-á neste artigo o desenvolvimento de modelos de simulação computacional para avaliação dos impactos ambientais e financeiros gerados pela extensão do ciclo de vida de computadores pessoais (PC). Assim, ao invés de serem destinados à coleta ou reciclagem do lixo eletrônico, os dispositivos componentes dos PCs (CPU, monitores de vídeo e dispositivos de entrada) são utilizados como matéria-prima para a fabricação de um “novo computador pessoal” (computador remanufaturado ou *remanufacturing computer*). Com os resultados gerados pelo modelo, pretende-se suprir os gestores das áreas de TICs e meio-ambiente de informações úteis ao processo decisório para desenvolvimento de melhores práticas no descarte de resíduos eletrônicos, ou seja, o possível resíduo tornando-se matéria-prima para a (re) manufatura de um equipamento em total condição de uso.

Além desta seção 1, introdução, o artigo está assim organizado: na seção 2, é apresentado o método de pesquisa utilizado para desenvolvimento do estudo, bem como a hipótese dinâmica a ser

verificada com a mesma metodologia. Na seção 3, é descrito o referencial teórico para o desenvolvimento do estudo, sendo apresentados os conceitos sobre a remanufatura de computadores e a Dinâmica de Sistemas. Na seção 4, são descritos o problema de modelagem, as variáveis componentes e o modelo desenvolvido. Na seção 5, são apresentados os cenários de simulação, a validação e um experimento utilizando o modelo. Por último, na seção 6, são apresentadas as considerações finais.

2 Método de pesquisa

Neste artigo, para o desenvolvimento do modelo computacional, realizou-se uma pesquisa com base na metodologia apresentada por Law (2015) para modelagem e simulação de sistemas. Este método é constituído pelos seguintes passos: (1) estudos exploratórios em artigos científicos, relatórios técnicos, entrevistas com *stakeholders* e observações do ambiente em que os dados foram coletados, o problema do estudo foi especificado e estruturado por meio desses dados; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema (definição das variáveis e seus relacionamentos); (3) implementação computacional da solução, utilizando-se o simulador Vensim (VENTANA SYSTEMS, 2016) da área de Dinâmica de Sistemas; (4) verificação e validação (v&v) da solução mediante testes em laboratório e análise do comportamento histórico (com os dados que foram possíveis avaliar), para verificar se os resultados obtidos representam parte da realidade observada, pois no ambiente simulado não existe destinação de resíduos para remanufatura, ou seja, o destino final é a coleta de resíduos eletrônicos. Então, para a validação do modelo como um todo, foi simulado um experimento utilizando dois cenários (otimista e moderado) para comparação.

O modelo foi concebido, verificado e validado tendo por objeto de análise uma instituição de ensino superior no Brasil, mas pode ser aplicado e estendido a outras organizações, desde que as especificidades do caso sejam adicionadas e tratadas no modelo.

As etapas de desenvolvimento do modelo foram realizadas na IES pela facilidade de acesso aos dados e às pessoas que possuem conhecimento sobre o tema do estudo, logo, a escolha dessa instituição foi por conveniência. A principal justificativa para avaliar-se a extensão do ciclo de vida dos computadores pessoais é que estes ainda são os equipamentos de maior quantidade em uso pelas pessoas (junto com os *smartphones*) (MEIRELLES, 2015), mas é aplicável (após pequenas adaptações) a qualquer uma das TICs disponíveis no mercado.

Os dados primários para as entradas do modelo foram coletados na instituição analisada, para desenvolvimento e validação do referido modelo. As informações relativas a valores de computadores remanufaturados e seus respectivos consumos energéticos foram extraídas de Frota-Neto e Bloemhof (2009, 2012) e Sahni et al. (2010). Para a definição das variáveis componentes do modelo, foram realizadas entrevistas com *stakeholders* da instituição (para garantir maior fidedignidade ao estudo), bem como foram efetuados observações sobre o processo de aquisição e descarte por parte dos pesquisadores e levantamento bibliográfico em artigos e relatórios técnicos (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2009, 2012; GIUTINI, GAUDETTE, 2003; HATCHER et al., 2013; SCHNEIDER et al., 2015).

2.1 Formulação da hipótese dinâmica

A hipótese dinâmica tem por objetivo trabalhar a teoria do problema, possibilitando analisar o comportamento deste problema e observar quais

as variáveis fazem parte do sistema (SILVA, 2006). Neste trabalho, incorporaram-se as seguintes variáveis básicas: número de computadores pessoais (PC), descarte para remanufatura, descarte para lixo eletrônico, computadores remanufaturados, benefícios econômicos e redução da emissão de CO₂ com o processo de remanufatura. 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 desenvolvido é a seguinte:

- A quantidade de computadores pessoais possui influência direta na quantidade total de computadores descartados, bem como, no total de computadores disponibilizados à remanufatura e ao lixo eletrônico, logo, quanto maior os índices de remanufatura, menor a destinação ao lixo eletrônico. Assim, economizam-se mais recursos financeiros e reduzem-se as emissões de CO₂ no meio ambiente.

3 Referencial teórico

Para o desenvolvimento do artigo, utilizou-se a simulação computacional por meio da Dinâmica de Sistemas para avaliação dos benefícios ambientais e financeiros da remanufatura de computadores pessoais (PC), logo, nesta seção serão abordados os temas componentes do artigo. Na seção 3.1, a remanufatura é apresentada; na sequência, na seção 3.2, apresentam-se o histórico e os conceitos básicos da metodologia de Dinâmica de Sistemas.

3.1 Remanufatura

Atualmente a busca pelo desenvolvimento sustentável é quesito obrigatório e legal, tanto para

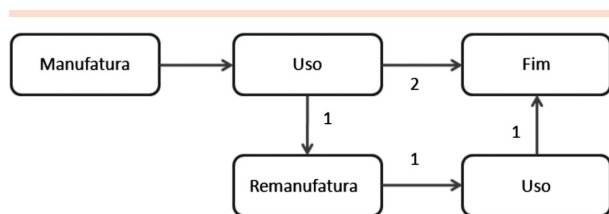
as indústrias como para a população em geral. Diante disso, estender a vida útil de um produto e de seus componentes pode ser uma prática não só ambientalmente correta e limpa, como também socialmente útil, uma vez que parte da população que não tem acesso às TICs, pelo elevado preço dos produtos novos, poderá adquirir um produto remanufaturado, ou seja, um produto fabricado com componentes que antes seriam descartados como resíduos eletrônicos.

A remanufatura é o processo de manufatura de um produto a partir de componentes que teriam seu ciclo de vida encerrado, mas que, com este processo, passam a ser matéria-prima para um “novo” produto. Esse processo apresenta as seguintes etapas de produção: inspeção, desmontagem, limpeza, reprocessamento, remontagem e teste (HATCHER et al., 2013).

Com relação ao ciclo de vida dos computadores novos e dos remanufaturados, Frota-Neto e Bloemhof (2009) afirmam que o processo de remanufatura acrescenta três novas fases ao processo de manufatura tradicional, quais sejam: a remanufatura propriamente dita, o transporte do produto remanufaturado e o tempo de vida extra que o produto adquire. Segundo os autores, produtos novos têm um ciclo de vida limitado de acordo com a durabilidade de seus componentes; porém, ao serem remanufaturados, este ciclo pode ser ampliado. Essa extensão do ciclo de vida é o grande benefício da remanufatura.

A Figura 1 (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2012) ilustra o ciclo de vida estendido do produto em duas situações distintas: o ciclo de vida de um produto remanufaturado (1) e o ciclo de vida tradicional de um produto, ou seja, uso e descarte (2).

A remanufatura possui algumas vantagens sobre a manufatura tradicional, pois o cliente paga menos pelo produto, a organização fabricante tem custos reduzidos para produzi-lo, e o processo consome uma quantidade menor de matéria-prima

**Figura 1: Ciclo de vida estendido do produto**

Fonte: Frota-Neto e Bloemhof (2012).

virgem e energia que o de produção tradicional, assim, caracterizando benefícios ambientais e econômicos (SUNDIN, DUNBÄCK, 2013). Giutini e Gaudette (2003), ao quantificarem os benefícios da remanufatura, mencionam que o custo de produção de um produto remanufaturado é 40% a 65% inferior a um novo produto, o preço final ao consumidor pode ser 40% inferior e é possível economizar anualmente o equivalente a 16 milhões de barris de petróleo com esse processo.

Frota-Neto e Bloemhof (2012), após detalhadas análises comparativas dos preços de computadores novos com relação ao preço de similares remanufaturados, concluem que o tempo tem influência negativa no preço residual dos remanufaturados. Para ilustrar tal conclusão, na Tabela 1, são apresentados os resultados gerados pelos mesmos autores em um estudo preliminar (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2009).

Tabela 1: Relação do preço residual com o tempo de uso do computador

Tempo de uso do computador	Preço residual (em relação ao produto novo)
Menos de 3 anos	62,2%
Entre 4 e 5 anos	22,5%
Entre 6 e 8 anos	10,2%
Mais de 8 anos	8,3%

Fonte: Frota-Neto e Bloemhof (2009).

Diversos pesquisadores na área de TI Verde abordam, dentre as melhores práticas, a busca incessante pela redução no consumo energético das TICs; porém, a remanufatura de computadores é pouco abordada por estes e, quando feita, é tratada

apenas por reutilização (DIAS et al., 2013; FARIA, MARTINS, SIQUEIRA, 2013; MURUGESAN, 2008; LUNARDI, ALVES, SALLES, 2014).

Ao analisarem o consumo de energia do ciclo de vida de PCs novos, Frota-Neto e Bloemhof (2012) utilizaram dados de sete fontes de pesquisa distintas e segregaram os resultados nas três etapas do ciclo de vida tradicional dos produtos: consumo de energia da manufatura do produto, consumo de energia relativa ao tempo médio (quatro anos) de uso do produto, e consumo de energia pelo transporte do produto até o consumidor final. Os resultados médios são apresentados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2: Demanda média de energia no ciclo de vida de um PC novo

Etapa do ciclo de vida	Demanda de Energia (MJ)	Demanda de energia (%)
Manufatura	6180	77,8
Uso	1733	21,9
Transporte	28	0,3
Total	7941	100

Fonte: Frota-Neto e Bloemhof (2012).

Para a determinação do consumo de energia por PCs remanufaturados, três novas etapas devem ser consideradas no cálculo, pois existem as demandas de energia para remanufaturar o produto, para transportá-lo do consumidor anterior até o novo consumidor e, também, a energia relativa ao uso desse equipamento, ou seja, a energia gasta é dependente da expectativa de tempo de duração do produto remanufaturado (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2012).

Os valores médios obtidos no estudo desenvolvido por Frota-Neto e Bloemhof (2012) relativos à comparação do consumo de energia dos computadores remanufaturados e dos novos são apresentados na Tabela 3. Para o estudo, foram consideradas as estimativas de consumo de energia dos produtos remanufaturados (consumo igual ou 30% superior), o tempo do ciclo de vida (igual

ou reduzido) e a energia consumida no processo de remanufatura (5% ou 30%). Cabe ressaltar que o consumo energético relativo ao transporte foi considerado no cálculo e que seu valor foi mantido o mesmo do processo de um computador novo. Somente em uma das análises realizadas, o consumo energético dos produtos remanufaturados foi superior ao dos produtos novos, o que se justifica por consumir demasiada energia no processo de remanufatura e possuir um ciclo de vida menor do que o de um produto novo. Ressalta-se ainda que os consumos de energia dos monitores de vídeo foram considerados em todos os cálculos executados.

Tabela 3: Comparação do consumo energético dos PCs remanufaturados e novos

	Consumo similar de energia	Consumo de 30% a mais de energia
Ciclo de vida reduzido (25% do produto novo)		
Nível baixo de energia na remanufatura	43,5%	52,0%
Nível alto de energia na remanufatura	116,5%	124,5%
Ciclo de vida longo (100% do produto novo)		
Nível baixo de energia na remanufatura	31,0%	39,5%
Nível alto de energia na remanufatura	49,5%	57,5%

Fonte: Frota-Neto e Bloemhof (2012).

Assim, a remanufatura dos PCs apresenta-se como uma alternativa viável tanto em quesitos econômicos (produto de menor custo) quanto em ambientais (produto consome menos energia em seu ciclo de vida). Neste artigo, buscou-se avaliar e quantificar, por meio do desenvolvimento de um modelo computacional de simulação, utilizando a Dinâmica de Sistemas, os benefícios do processo de remanufatura dos computadores pessoais.

3.2 Dinâmica de Sistemas

A metodologia de Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*), desenvolvida por Jay

Forrester, na década de 1950, possibilita estudar o comportamento dos sistemas com relação ao passar do tempo, assim sendo, é uma metodologia que, ao ser utilizada, permite aos seus usuários avaliarem as consequências de suas decisões em um horizonte temporal futuro (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005).

A estrutura para a concepção de modelos em Dinâmica de Sistemas é composta por dois componentes principais, que são os estoques e os fluxos. Os estoques referem-se às variáveis do modelo que são acumuladas no sistema e aos fluxos que são as decisões ou políticas do sistema. Estes componentes podem estar organizados na forma de relações de causa e efeito, denominadas *feedback* de balanço ou de reforço e estão sujeitos às defasagens temporais no sistema em análise. Ford (2009) define a Dinâmica de Sistemas como um método que combina fluxos e estoques em uma estrutura computacional para ser simulado.

Diversos autores utilizam-se desta metodologia para a análise de questões relacionadas ao meio-ambiente e a sustentabilidade, dentre as quais, podem-se citar os estudos de Sufian e Bala (2007); Abeliotis et al. (2009); Dyson e Chang (2005); Kum et al. (2005) e Simonetto (2014).

Neste trabalho, utilizou-se a Dinâmica de Sistemas porque este método vai ao encontro do objetivo principal aqui proposto, que é o de avaliar, em um horizonte futuro de tempo, as possibilidades de benefícios ambientais e econômicos da remanufatura de computadores pessoais (PC), a partir de computadores usados, que seriam destinados à coleta de resíduos eletrônicos.

4 Desenvolvimento do Modelo de Simulação

A crescente geração de resíduos pelas Tecnologias de Informação e Comunicação tem

exigido dos gestores públicos investimentos de recursos em novas técnicas para o adequado tratamento desses resíduos, pois são altamente tóxicos e poluentes. A remanufatura, como descrito anteriormente, surge como uma alternativa viável para prolongar o ciclo de vida desses equipamentos, evitando, desse modo, um possível descarte prematuro. Neste artigo, propõe-se desenvolver e validar um modelo de simulação para avaliar os impactos ambientais e financeiros que a remanufatura pode ter quando comparada à destinação final para a coleta de resíduos eletrônicos (*e-waste*).

As decisões, a partir dos resultados gerados pelo modelo, poderão envolver a adoção da remanufatura (total ou parcialmente) ao invés do descarte final, incentivando a redução da emissão de CO₂ e obtendo um maior retorno financeiro, tendo em vista, que o equipamento quando descartado como resíduo tem seu valor residual quase nulo. Outras decisões, tais como redução de compras, reutilização de PCs remanufaturados, também poderão ser sugeridas. Análises e observações de

interesse dos gestores ambientais e/ou organizacionais, desde que elas sejam passíveis de execução no modelo de simulação, poderão ser executadas, pois o modelo foi concebido buscando simplificar a interação usuário-modelo, para que análises do tipo *what-if* sejam de simples execução.

Para a definição das variáveis componentes do modelo, foram utilizados: observações, por parte dos pesquisadores no processo de compra e de descarte de computadores pessoais por uma IES pública no Brasil; documentos públicos sobre compra e descarte; artigos técnico-científicos relacionados ao tema remanufatura; resíduos eletrônicos e TI Verde (FROTA-NETO; BLOEMHOF, 2009, 2012; GIUTINI; GAUDETTE, 2003; SCHNEIDER et al., 2015). Na Figura 2, pode ser visualizada a estruturação do modelo em submodelos.

As variáveis utilizadas na implementação do modelo, bem como suas inter-relações com outras variáveis podem ser observadas na Figura 3, a qual apresenta o diagrama de causa-efeito desse modelo. Analisando-se o diagrama, podem-se verificar

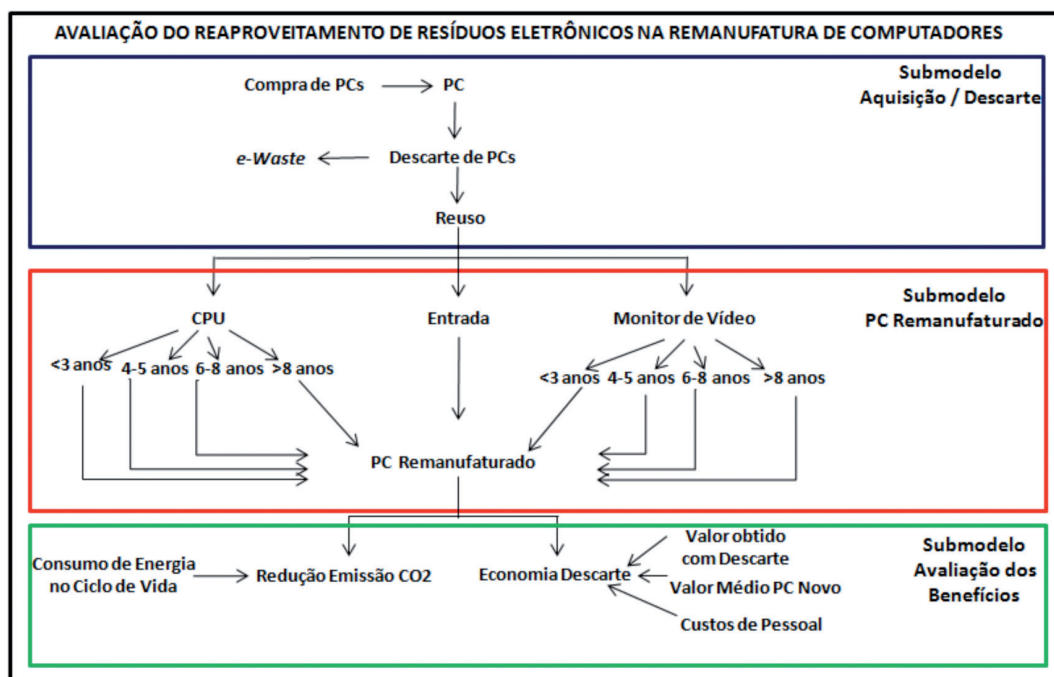


Figura 2: Estruturação e variáveis componentes do modelo

Fonte: Os autores.

os impactos positivos e negativos que as variáveis promovem entre si. No caso em análise, constatou-se a influência do número total de computadores pessoais (em uso e descartados) nos computadores destinados ao *e-waste* e nos dispositivos que poderiam ser utilizados na remanufatura, bem como na quantidade de computadores remanufaturados. Também, verificou-se a influência da quantidade de computadores remanufaturados na redução da emissão de CO₂ e na economia com o processo de descarte de computadores.

Para uma melhor estruturação do desenvolvimento, o modelo foi concebido em três submodelos denominados: (a) Aquisição/Descarte, (b) PC Remanufaturado e; (c) Avaliação dos Benefícios, conforme mostrado na Figura 2. Nas próximas subseções serão apresentados os submodelos e sua modelagem utilizando a Dinâmica de Sistemas.

em uso no ambiente modelado (PC), de monitores (Monitor Reusable), de dispositivos de entradas (InputDev Reusable) e CPUs (CPU Reusable) que possam ser reutilizadas no processo de remanufatura, bem como de dispositivos que não têm condições de remanufaturamento (Monitor e-Waste, CPU e-Waste e InputDev e-Waste).

As variáveis de fluxo utilizadas e suas auxiliares são as seguintes: a entrada (aquisição) de computadores (InputPC) determinada pela quantidade anual de equipamentos adquiridos (QuantIn), o descarte dos computadores (OutPC) diretamente relacionado à quantidade anual de equipamentos direcionados ao descarte (QuantOut). Os fluxos dos dispositivos direcionados a cada ano à remanufatura (InputMon, InputCPU e InputInDev) são definidos pelas taxas dos componentes que podem ser reutilizados (Reuse Monitor Rate, Reuse CPU Rate e Reuse

InDev Rate) associadas a cada um desses, mas levando em consideração o total de PCs descartados para obtenção do total de cada dispositivo. Para obtenção das variáveis de fluxo relativas aos dispositivos que serão enviados anualmente aos resíduos eletrônicos (QtMon e-Waste, QtCPU e-Waste e QtInput e-Waste), utiliza-se a quantidade total de computadores descartados subtraindo-se

desse valor a quantidade de dispositivos disponibilizados à remanufatura. A Figura 4 apresenta o diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Compra/Descarte. Na Figura 7, são apresentadas as equações (de 1 a 15) componentes desse submodelo, e os valores atribuídos às variáveis encontram-se descritos mais adiante na Tabela 4.

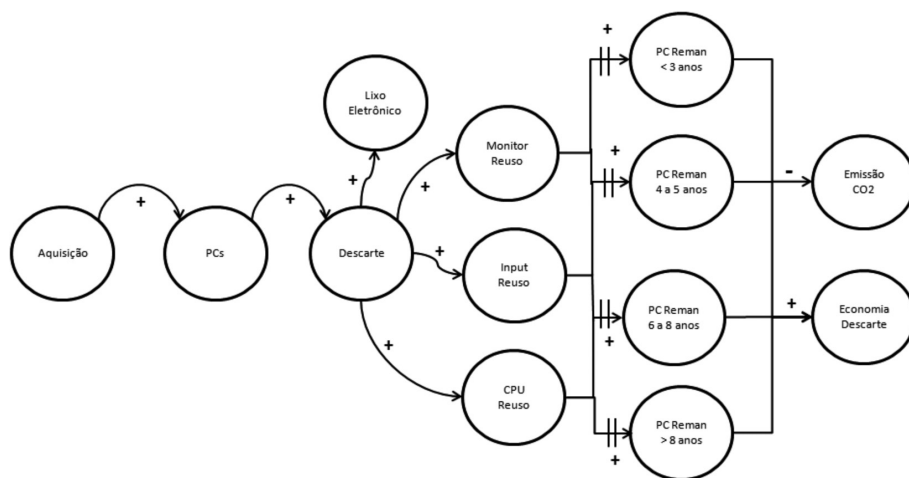


Figura 3: Diagrama de causa-efeito do modelo
Fonte: Os autores.

4.1 Submodelo Aquisição/ Descarte

O submodelo Aquisição/ Descarte tem por finalidade modelar o comportamento relativo às compras e, posterior, descarte dos computadores. As variáveis de estoque componentes desse submodelo são: as quantidades de computadores pessoais

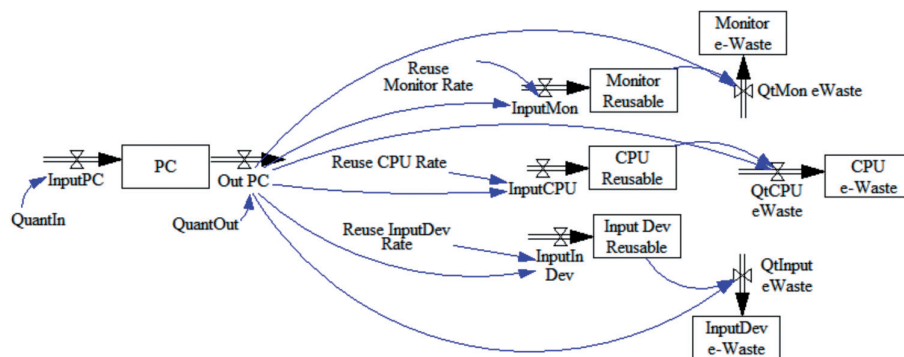


Figura 4: Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Aquisição/Descarte

Fonte: Os autores.

4.2 Submodelo PC Remanufaturado

O submodelo PC Remanufaturado tem por princípio as variáveis de fluxo InputMon, InputCPU e InputInDev do submodelo Aquisição/Descarte. Essas variáveis serão utilizadas para determinação da quantidade dos dispositivos computacionais disponíveis à remanufatura (QuantCPU <3, QuantCPU 45, QuantCPU 68, QuantCPU >8, QuantMon <3, QuantMon 45, QuantMon 68, QuantMon >8). As variáveis foram definidas de acordo com a classificação de tempo de uso proposta por Frota-Neto e Bloemhof (2009), a qual é utilizada para a definição de preço residual e de consumo de energia. Para a definição da quantidade de dispositivos de entrada a ser utilizada (teclados e *mouses*) foi mantida a variável InputInDev, em razão desses componentes serem compatíveis com outros dispositivos de *hardware* independentes do tempo de uso. Ainda, para a definição dos dispositivos com relação ao tempo de uso, as variáveis de taxa RateCPU3, RateCPU45, RateCPU68, RateCPU8, RateMon3, RateMon45, RateMon68, QuantMon8 foram adicionadas ao modelo. Estas representam o percentual de dispositivos de cada tipo de classificação temporal no total de dispositivos destinados ao descarte.

Após definidas as variáveis relativas às quantidades de dispositivos de *hardware* (por tempo de uso), essas serão utilizadas para composição das variáveis de fluxo InpPCRem <3y, InpPCRem 4y5y, InpPCRem 6y8y e InpPCRem >8y, que representarão a quantidade de computadores que poderão ser remanufaturados a cada

ano simulado. Para a definição dessas variáveis de fluxo, foi levado em consideração o possível tempo de produção dos computadores, pois todo o dispositivo disponível para remanufatura precisa cumprir as etapas desse processo (HATCHER et al., 2013). Para a definição da quantidade de computadores a ser produzida, utiliza-se como parâmetro o número de dispositivos com menor quantidade à disposição no momento da decisão.

As variáveis que representam o tempo de produção (*delay*) são: ProdTime<3y, ProdTime 4y5y, ProdTime 6y8y e ProdTime>8y. As variáveis auxiliares, Input3, Input45, Input68 e Input8, foram utilizadas para auxiliar na determinação das equações relativas às variáveis de fluxo. Por fim, as variáveis de estoque do submodelo representam o total de computadores de cada tipo produzidos durante o tempo simulado (PC Reman<3y, PC Reman 4y5y, PC Reman 6y8y e PC Reman>8y). A Figura 5 apresenta o submodelo PC Remanufaturado. As equações do submodelo e os valores atribuídos às variáveis são apresentados na Figura 7 (equações 16 a 35) e na Tabela 4.

4.3 Submodelo Avaliação dos Benefícios

O último submodelo componente da modelagem desenvolvida é denominado Avaliação dos

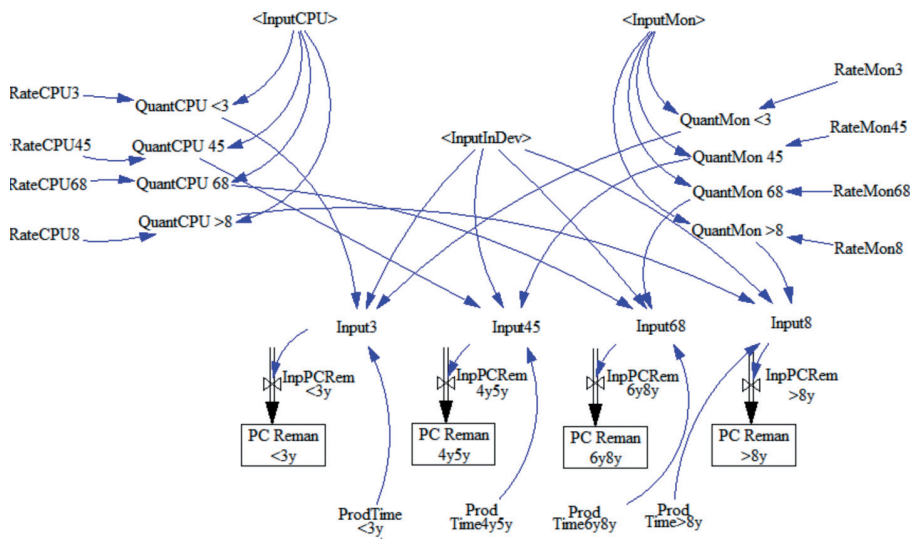


Figura 5: Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo PC Remanufaturado

Fonte: Os autores.

Benefícios, nesse, são gerados os resultados relacionados ao benefício ambiental proporcionado, no caso, a redução da emissão de CO₂ no ambiente e também o benefício financeiro alcançado, sendo neste último avaliado o ganho que pode ser obtido pela remanufatura dos computadores comparado à venda destes como resíduos eletrônicos. Ou seja, que valor a mais se pode obter remanufaturando os equipamentos. Os custos de pessoal para execução da remanufatura foram considerados no desenvolvimento do modelo.

O submodelo inicia-se com o total de PCs Remanufaturados (InpPCRem <3y, InpPCRem 4y5y, InpPCRem 6y8y e InpPCRem >8y), os quais farão parte da equações em que serão obtidas as variáveis de fluxo da redução anual da emissão de gás carbônico (YearReducCO2) e da economia anual originada pela remanufatura dos PCs (YearSavMoney). A variável auxiliar TotalPCLifeCycleDandedEnergy foi necessária para atribuir-se os possíveis consumos pelos PCs em seus ciclos de vidas tradicionais e estendidos. Para a determinação da redução da emissão de CO₂ (YearReducCO2), leva-se em consideração

a quantidade de energia utilizada por um computador novo em todo seu ciclo de vida; porém, um computador remanufaturado pode não consumir a mesma quantidade de um novo. Assim, embasados na premissa de que a cada computador remanufaturado é um computador novo a menos em uso, definiu-se a equação para cálculo da redução da emissão de CO₂ na atmosfera.

Já as variáveis auxiliares StaffCosts, PCAvgValue e ValueOfWaste foram utilizadas para o cálculo

do ganho financeiro que pode ser obtido pela remanufatura. Para a determinação da equação do ganho obtido anualmente com a venda dos computadores remanufaturados (YearSavMoney), primeiro, levou-se em consideração a quantidade de cada tipo de computador remanufaturado (com relação ao tempo de uso) e aplicou-se o fator de redução do preço do produto novo, conforme a classificação temporal de Frota-Neto e Bloemhof (2009). Em seguida, deduziu-se do valor total os custos com mão de obra e o total que seria arrecadado caso os computadores descartados fossem vendidos como lixo eletrônico.

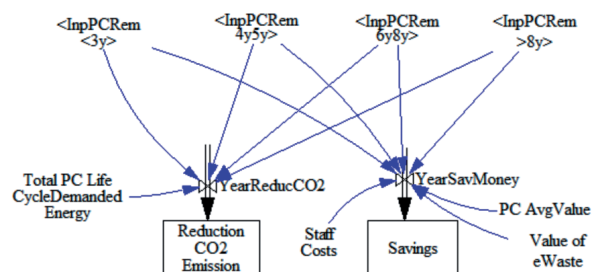


Figura 6: Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Avaliação de Benefícios

Fonte: Os autores.

As variáveis de estoque ReductionCO2 Emission e Savings representam o total acumulado ao longo do tempo simulado. As equações referentes ao submodelo bem como os valores atribuídos às variáveis são apresentados na Figura 7 (equações 36 a 39) e na Tabela 4.

5 Validação e experimento do modelo

Em trabalhos de pesquisa envolvendo o desenvolvimento de modelagem computacional para representação de sistemas do mundo real, uma das

- (1) $\text{InputPC}^t = \text{QuantIn}^t$
- (2) $\text{OutputPC}^t = \text{QuantOut}^t$
- (3) $\text{PC}^t = \text{PC}^{(t-1)} + \text{InputPC}^t - \text{OutputPC}^t$
- (4) $\text{InputCPU}^t = \text{OutputPC}^t * \text{ReuseCPURate}^t$
- (5) $\text{InputInDev}^t = \text{OutputPC}^t * \text{ReuseInputDevRate}^t$
- (6) $\text{InputMon}^t = \text{OutputPC}^t * \text{ReuseMonitorRate}^t$
- (7) $\text{QtCPU eWaste}^t = \text{OutputPC}^t - \text{InputCPU}^t$
- (8) $\text{QtInput eWaste}^t = \text{OutputPC}^t - \text{InputInDev}^t$
- (9) $\text{QtMon eWaste}^t = \text{OutputPC}^t - \text{InputMon}^t$
- (10) $\text{CPU Reusable}^t = \text{CPU Reusable}^{(t-1)} + \text{InputCPU}^t$
- (11) $\text{InputDev Reusable}^t = \text{InputDev Reusable}^{(t-1)} + \text{InputInDev}^t$
- (12) $\text{Monitor Reusable}^t = \text{Monitor Reusable}^{(t-1)} + \text{InputMon}^t$
- (13) $\text{CPU e-Waste}^t = \text{CPU e-Waste}^{(t-1)} + \text{QtCPU eWaste}^t$
- (14) $\text{InputDev e-Waste}^t = \text{InputDev e-Waste}^{(t-1)} + \text{QtInput eWaste}^t$
- (15) $\text{Monitor e-Waste}^t = \text{Monitor e-Waste}^{(t-1)} + \text{QtMon eWaste}^t$
- (16) $\text{QuantCPU45}^t = \text{InputCPU}^t * \text{RateCPU45}^t$
- (17) $\text{QuantCPU68}^t = \text{InputCPU}^t * \text{RateCPU68}^t$
- (18) $\text{QuantCPU<3}^t = \text{InputCPU}^t * \text{RateCPU3}^t$
- (19) $\text{QuantCPU>8}^t = \text{InputCPU}^t * \text{RateCPU8}^t$
- (20) $\text{QuantMon45}^t = \text{InputMon}^t * \text{RateMon45}^t$
- (21) $\text{QuantMon68}^t = \text{InputMon}^t * \text{RateMon68}^t$
- (22) $\text{QuantMon<3}^t = \text{InputMon}^t * \text{RateMon3}^t$
- (23) $\text{QuantMon>8}^t = \text{InputMon}^t * \text{RateMon8}^t$
- (24) $\text{Input3}^t = \text{DELAY}(\text{MIN}(\text{QuantCPU<3}^t, \text{InputInDev}^t, \text{QuantMon<3}^t), \text{ProdTime<3y}^t, 0)$
- (25) $\text{Input45}^t = \text{DELAY}(\text{MIN}(\text{QuantCPU45}^t, \text{InputInDev}^t, \text{QuantMon45}^t), \text{ProdTime4y5y}^t, 0)$
- (26) $\text{Input68}^t = \text{DELAY}(\text{MIN}(\text{QuantCPU68}^t, \text{InputInDev}^t, \text{QuantMon68}^t), \text{ProdTime6y8y}^t, 0)$
- (27) $\text{Input8}^t = \text{DELAY}(\text{MIN}(\text{QuantCPU>8}^t, \text{InputInDev}^t, \text{QuantMon>8}^t), \text{ProdTime>8y}^t, 0)$
- (28) $\text{InpPCRem4y5y}^t = \text{Input45}^t$
- (29) $\text{InpPCRem6y8y}^t = \text{Input68}^t$
- (30) $\text{InpPCRem<3y}^t = \text{Input3}^t$
- (31) $\text{InpPCRem>8y}^t = \text{Input8}^t$
- (32) $\text{PC Reman4y5y}^t = \text{PC Reman4y5y}^{(t-1)} + \text{InpPCRem4y5y}^t$
- (33) $\text{PC Reman6y8y}^t = \text{PC Reman6y8y}^{(t-1)} + \text{InpPCRem6y8y}^t$
- (34) $\text{PC Reman<3y}^t = \text{PC Reman<3y}^{(t-1)} + \text{InpPCRem<3y}^t$
- (35) $\text{PC Reman>8y}^t = \text{PC Reman>8y}^{(t-1)} + \text{InpPCRem>8y}^t$
- (36) $\text{YearReducCO2}^t = (((\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t - (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t * 0.31) * \text{InpPCRem<3y}^t) + (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t - (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t * 0.31) * \text{InpPCRem4y5y}^t) + (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t - (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t * 0.31) * \text{InpPCRem6y8y}^t) + (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t - (\text{Total PCLifeCycleDandedEnergy}^t * 0.31) * \text{InpPCRem>8y}^t)) / 3600 * 462.375$
- (37) $\text{YearSavMoney}^t = (\text{InpPCRem<3y}^t * \text{PCAvgValue}^t * 0.622) + (\text{InpPCRem4y5y}^t * \text{PCAvgValue}^t * 0.225) + (\text{InpPCRem6y8y}^t * \text{PCAvgValue}^t * 0.102) + (\text{InpPCRem>8y}^t * \text{PCAvgValue}^t * 0.083) - (\text{InpPCRem<3y}^t + \text{InpPCRem4y5y}^t + \text{InpPCRem6y8y}^t + \text{InpPCRem>8y}^t) * \text{ValueOfeWaste}^t$
- (38) $\text{ReductionCO2 Emission}^t = \text{ReductionCO2 Emission}^{(t-1)} + \text{YearReducCO2}^t$
- (39) $\text{Savings}^t = \text{Savings}^{(t-1)} + \text{YearSavMoney}^t$

Figura 7: Equações do modelo de simulação

Fonte: Os autores.

partes mais importantes, e críticas, é a verificação e a validação do modelo. Pidd (1998) afirma que um modelo é uma representação do mundo real ou de parte dele. Portanto, tudo que a validação precisa fazer é verificar se o comportamento do modelo e do mundo real ocorre sob as mesmas condições. Se sim, o modelo é válido. Se não, então o modelo não é válido. Finlay (1994) também afirma que não é possível um modelo conseguir representar o sistema do mundo real na sua totalidade, mas existe a possibilidade de definirem-se relacionamentos entre os componentes do modelo para que estes permitam uma representação aceitável do mundo real. Por sua vez, a verificação deve garantir que todos os requisitos para o desenvolvimento do modelo estão devidamente contemplados nele e que ele é isento de erros na sua concepção (SOMMERVILLE, 2015).

No desenvolvimento do modelo apresentado neste artigo, a verificação e a validação fizeram-se presente em todas as etapas da sua concepção. Na primeira fase (modelo conceitual), foram utilizados dados de artigos científicos, relatórios de compra e descarte e, também, contou com a participação de *stakeholders* para definir as variáveis da modelagem proposta.

Na segunda fase, quando da implementação no simulador Vensim (VENTANA SYSTEMS, 2016), foram utilizados dados históricos para a verificação da integração entre os módulos componentes do modelo, bem como dos resultados gerados, pois foram avaliadas as saídas produzidas pelo modelo de simulação a partir de dados reais fornecidos a estes. Em ambos os casos, os resultados foram satisfatórios e atenderam às expectativas dos projetistas.

Na terceira fase de verificação e validação, para a construção do experimento, foram utilizados dados e taxas de uma IES pública. Ressalta-se que a remanufatura de computadores, atualmente, não é executada na IES, na qual os dados foram

coletados, mas todas as taxas de aquisição, descarte, valor médio de aquisição, valor de venda do resíduo eletrônico e tempos de uso dos PCs são reais, assim como, o custo de mão de obra, que é considerado como zero pelo fato de a instituição proceder a remanufatura utilizando os profissionais do setor de manutenção. Os dados para cálculo do valor residual do PC remanufaturado foram obtidos em Frota-Neto e Bloemhof (2009). As equações relativas ao consumo de energia em PCs remanufaturados foram desenvolvidas com base no estudo desenvolvido em Frota-Neto e Bloemhof (2012). Com relação à redução de emissão de CO₂, os dados são oriundos de Environment Protection Agency – EPA (2016).

Para a execução da terceira fase de validação do modelo, foram gerados dois cenários denominados: (a) Cenário Otimista e (b) Cenário Moderado. O detalhamento de ambos é apresentado na Tabela 4.

Para a definição do cenário otimista, levaram-se em consideração os índices de reaproveitamento dos resíduos de países como a Holanda, em que se trata como resíduo apenas 4% do total de resíduos gerados pela população (EUROSTAT, 2011). Ou seja, aproveita-se entre 80% e 90% dos computadores descartados, bem como o princípio dos 3Rs (redução do consumo, reuso do resíduo e reciclagem) previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012) (no caso de reduzir-se a compra de computadores novos). Por sua vez, o cenário moderado foi definido pelos pesquisadores a partir de critérios com menores impactos que o cenário otimista, mas que, por sua vez, teria um impacto positivo no caso de ser colocado em prática pela IES.

5.1 Experimento e resultados

Após a definição dos dois cenários para a experimentação do modelo, foram executadas as simulações no simulador Vensim (VENTANA

Tabela 4: Detalhamento dos cenários executados no modelo

Taxas	Cenário	
	Otimista	Moderado
Entrada de PCs	Nos dois anos iniciais, a taxa de compra atual é de 340 PC/ano, posteriormente, reduz-se 10%, sendo mantido até o fim do tempo simulado.	Mantém-se a taxa de compra atual de 340 PC/ano até o fim do tempo simulado.
Descarte de PCs	Utiliza-se inicialmente a taxa de descarte atual de 110 PC/ano e, posteriormente, aumenta-se o descarte em 10% a cada dois anos.	Utiliza-se inicialmente a taxa de descarte atual de 110 PC/ano e, posteriormente, aumenta-se o descarte em 10% a cada dois anos.
Reuso de monitores	Aumenta-se até 20% no segundo ano; até 40%, no quarto; até 60%, no sexto, e até 80%, no oitavo ano. Posteriormente, mantém-se 80% até o fim.	Aumenta-se até 20% no quarto ano e mantém-se até o fim.
Reuso de CPU	Aumenta-se até 20%, no segundo ano; até 40%, no quarto; até 60%, no sexto, e até 80%, no oitavo ano. Posteriormente, mantém-se 80% até o fim.	Aumenta-se até 20% no quarto ano e mantém-se até o fim.
Reuso de dispositivo de entrada	Aumenta-se até 20%, no segundo ano; até 40%, no quarto; até 60%, no sexto, e até 80%, no oitavo ano. Posteriormente, do oitavo ao décimo ano, eleva-se a 90%.	Aumenta-se até 20% no quarto ano e mantém-se até o fim.
Monitores e CPU com menos de 3 anos	Utiliza-se a taxa real de 1%, e eleva-se a 2% ao longo da simulação.	Utiliza-se a taxa real de 1%.
Monitores e CPU entre 4 e 5 anos	Utiliza-se a taxa real de 4% e eleva-se a 8% ao longo da simulação.	Utiliza-se a taxa real de 4%.
Monitores e CPU entre 6 e 8 anos	Utiliza-se a taxa real de 70% e diminui-se a 65% ao longo da simulação.	Utiliza-se a taxa real de 70%.
Monitores e CPU com mais de 8 anos	Utiliza-se a taxa real de 25% em toda a simulação.	Utiliza-se a taxa real de 25%.
Tempo de remanufatura	3 meses	6 meses
Consumo de energia no ciclo de vida do	7941 MJ	7941 MJ
Preço médio dos PCs	USD 500	USD 500
Valor de venda do PC aos resíduos	USD 0.04	USD 0.04
Custo de mão de obra	USD 0	USD 0
Consumo de energia do PC remanufaturado	3 anos ou menos – 31% do PC novo Entre 4 e 5 anos – 31% do PC novo Entre 6 e 8 anos – 43,5% do PC novo Mais que 8 anos – 116,5% do PC novo	3 anos ou menos – 31% do PC novo Entre 4 e 5 anos – 31% do PC novo Entre 6 e 8 anos – 43,5% do PC novo Mais que 8 anos – 116,5% do PC novo

Fonte: Os autores.

SYSTEMS, 2016), em um computador, com processador Pentium Core i3 e 4 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação foi na ordem de centésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado no experimento foi o de dez anos; porém, a configuração dessa variável fica a cargo do projetista/usuário, pois esta depende da análise a ser feita.

Com o modelo desenvolvido, diversas análises podem ser executadas e, no atual estudo,

foram selecionadas as que pareceram ser mais relevantes na opinião dos autores e dos *stakeholders* da instituição, sendo coletadas as informações para o desenvolvimento do modelo, tais como número de computadores na instituição (de acordo com histórico de compra/descarte), CPUs descartadas e reutilizadas, ganhos financeiros que podem ser obtidos a partir da remanufatura dos computadores e redução da emissão de CO₂ provenientes do uso dos computadores

remanufaturados. Na seleção dos critérios avaliados neste trabalho, levou-se em consideração a necessidade de informação dos *stakeholders*, no caso, da quantidade de computadores em uso e de descartados na IES (atual e futura), bem como se considerou o objetivo da pesquisa, ou seja, a quantidade possível de remanufatura e as questões financeiras e ambientais avaliadas.

É importante ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, sendo toda e qualquer análise do tipo “*what if*” de simples e fácil utilização, pois quando da modificação nos valores das taxas e variáveis, novos resultados são gerados para análise dos usuários.

A primeira análise a ser desenvolvida com o uso do modelo refere-se à quantidade de computadores em uso na instituição nos próximos anos, pois atualmente existem mais de dez mil computadores em uso e o número de compra é maior que o número de descarte. A quantidade de aquisição nos últimos três anos diminuiu consideravelmente (hoje se encontra entre 300 e 400 computadores/ano), mas houve períodos em que foram comprados quase 2 mil computadores. Para analisar a variável, manteve-se o número de aquisições acima de 340 computadores no cenário otimista; e 340, no moderado; porém, em ambos os cenários, elevou-se em 5% ao ano a quantidade de descartes. O resultado mostra, que ao fim de dez anos, o número de computadores pessoais terá um crescimento de 23,17% no cenário moderado, e de 20,25%, no otimista (no qual, diminuem-se as compras e aumentam-se os descartes). Assim, o resultado denota a importância de a instituição ter políticas de sustentabilidade ambiental e financeira para tratamento das TICs a serem adquiridas/descartadas. A Figura 8 apresenta a variação da quantidade de PCs ao longo do tempo simulado.

Outra análise realizada no modelo de simulação diz respeito à quantidade de dispositivos que poderiam ser reutilizados, mas que têm como

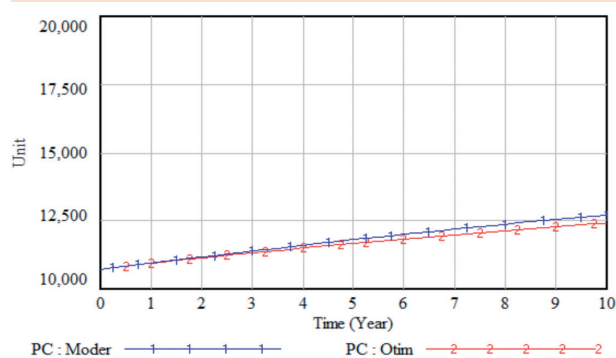


Figura 8: Variação da quantidade de PCs

Fonte: Os autores.

destino os resíduos eletrônicos da instituição. No caso específico, foi avaliada a quantidade de CPUs descartadas, uma vez que elas apresentavam o maior número de componentes (placas, memórias, processadores, etc.) em sua composição. Atualmente, todas as CPUs são descartadas como lixo eletrônico, mas caso fosse implantada uma política de reaproveitamento dos dispositivos, como, por exemplo, a remanufatura de computadores, verifica-se que com os cenários definidos anteriormente a quantidade de CPUs descartadas (*e-waste*) no décimo ano simulado seria de apenas 36 (20,2%) unidades do total gerado no cenário otimista, e 142 (79,8%) unidades, no moderado. A Figura 9 apresenta a variação anual da quantidade descartada de CPUs comparada à quantidade considerada lixo eletrônico na instituição.

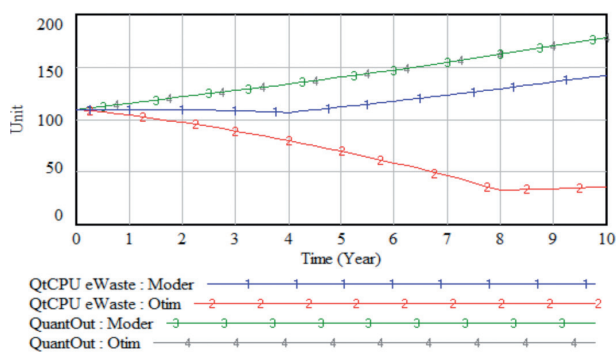


Figura 9: Total de CPUs descartadas comparado à quantidade de CPUs consideradas lixo eletrônico

Fonte: Os autores.

De modo a facilitar o entendimento das análises relativas ao quantitativo de computadores que poderiam ser remanufaturados, a Tabela 5 apresenta o total de cada grupo de classificação ao final do tempo simulado (dez anos). No cenário otimista para remanufatura dos computadores, poderiam ser produzidas 659 unidades; dessas, 447 seriam fabricadas com unidades descartadas após o uso no ciclo de vida tradicional, de um período entre seis e oito anos. O total de computadores remanufaturados produzidos no cenário otimista representa o reaproveitamento de 46,9% das unidades descartadas. Logo, apesar de otimista, a quantidade remanufaturada não atinge a metade dos computadores descartados; porém, é bastante elevada quando comparada à situação atual, em que todo o descarte é tratado como lixo eletrônico. Na simulação do cenário moderado, seriam remanufaturados 200 computadores, o que representa uma taxa de remanufatura de 14,2% nos dez anos simulados.

Tabela 5: Total de computadores remanufaturados nos cenários simulados

Uso dos dispositivos	Cenário otimista	Cenário moderado
Menos de 3 anos	7	1
Entre 4 e 5 anos	40	5
Entre 6 e 8 anos	447	145
Mais de 8 anos	165	49
Total	659	200

Fonte: Os autores.

A próxima análise realizada diz respeito aos benefícios financeiros que podem ser gerados com a venda dos computadores remanufaturados. Foi analisado o possível ganho financeiro relativo ao ganho atual (venda como resíduo eletrônico), tendo por base os preços residuais de venda dos computadores pós-remanufatura apresentados em Frota-Neto e Bloemhof (2009). Fica evidente que nos dois primeiros anos do tempo simulado, em ambos os cenários, o ganho obtido com as vendas é baixo, mas ao fim do décimo ano simulado o

valor no cenário otimista é de aproximadamente 36.310 dólares. No cenário moderado, o ganho é de 10.070 dólares. Quando comparados com a atual média anual de ganho (5,50 dólares), os ganhos de ambos os cenários denotam uma excelente oportunidade de minimizar as perdas relativas às despesas com TICs. A Figura 10 e a Tabela 6 apresentam os resultados relacionados aos possíveis benefícios financeiros dos cenários simulados.

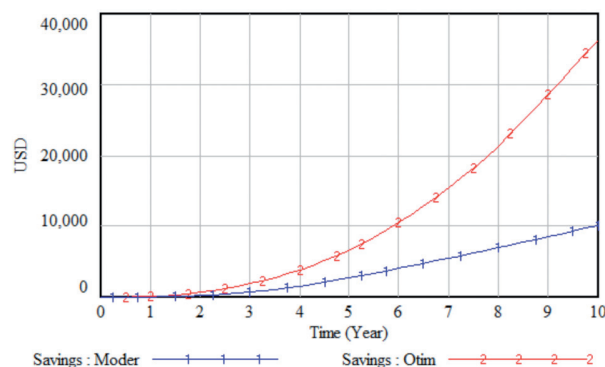


Figura 10: Benefício financeiro anual obtido com a remanufatura

Fonte: Os autores.

Na última das análises mostradas neste artigo, avaliou-se o potencial de redução da emissão de CO₂ na atmosfera a partir da remanufatura dos computadores. Nessa análise, parte-se do pressuposto que, com o prolongamento do ciclo de vida de um computador, o consumo de energia deste é menor do que o de um novo, pois, no ciclo de vida dos equipamentos novos, a etapa que consome mais energia é a de sua manufatura (77% do consumo total). Para a realização dos cálculos, foram utilizadas as taxas de consumo apresentadas por Frota-Neto e Bloemhof (2012), já descritas anteriormente no artigo. A evolução anual da redução da emissão do CO₂ pode ser visualizada na Figura 11, na qual se verifica que, em ambos os cenários, houve pouca redução das emissões no início do tempo simulado. No cenário otimista, no décimo ano simulado, as emissões foram reduzidas em 569 618 kg CO₂, por sua vez, no cenário

moderado, a redução total da emissão é de aproximadamente 200 mil kg/CO₂ no mesmo período. Uma análise comparativa com a situação atual de emissão de CO₂ é de difícil execução, pois não se tem os dados do destino de cada equipamento após sua venda como resíduo eletrônico. Os dados totais de redução da emissão de CO₂ podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6: Total nos cenários simulados em comparação com a situação atual

	Cenário otimista	Cenário moderado	Cenário atual
Redução da emissão CO ₂	569 618 kg CO ₂ e	199 726 kg CO ₂ e	Indefinido
Possibilidade de ganho financeiro	USD 36.310	USD 10.075	USD 55

Fonte: Os autores.

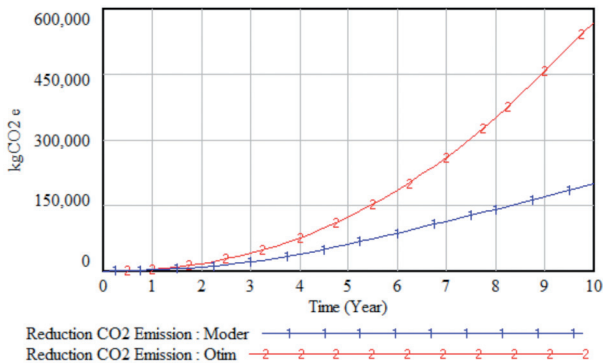


Figura 11: Redução anual da emissão de CO₂ com a remanufatura

Fonte: Os autores.

6 Considerações finais

O principal objetivo nesta pesquisa foi desenvolvimento, verificação, validação e experimento de modelos de simulação computacional para avaliação de cenários para a remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior, na qual não existe a política de reaproveitamento dos resíduos eletrônicos. Com relação à hipótese apresentada no método de investigação, esta foi confirmada, uma vez que a remanufatura dos

computadores diminui o número de computadores destinados à venda como lixo eletrônico, assim, podendo gerar ganho financeiro com a venda dos computadores remanufaturados, bem como reduzir a quantidade de CO₂ liberada na atmosfera.

Para o desenvolvimento do modelo computacional, foram utilizadas variáveis, como, por exemplo, o número de computadores comprados e o de descartados, a taxa de aproveitamento de dispositivos computacionais e o tempo para o processo de remanufatura dos computadores. A partir dessas variáveis, o sistema é capaz de estimar a quantidade de computadores a serem remanufaturados e os possíveis ganhos ambientais e financeiros com o processo. Com os resultados gerados pela simulação, os gestores institucionais poderão definir as políticas de compra e descarte dos computadores, levando em consideração a sustentabilidade financeira e ambiental no processo decisório com relação aos custos de TICs.

Nesta pesquisa, foram utilizados dois cenários distintos para validação e avaliação do modelo utilizando dados de uma instituição de ensino superior. Os resultados obtidos são condizentes com a realidade, conforme os dados reais de compra, descarte e tempo de ciclo de vida dos equipamentos, na instituição. As taxas de reuso, as de envio dos equipamentos descartados como lixo eletrônico e o tempo de remanufatura para ambos os cenários foram criados pelos projetistas do modelo para realização deste estudo. Cabe ressaltar que os cenários foram gerados para esse experimento; porém, o modelo pode ser configurado de acordo com as necessidades de quem for utilizá-lo, ou seja, é um modelo reconfigurável e aberto.

Com relação específica aos resultados obtidos, para os cenários avaliados, o cenário otimista apresentou melhores resultados que o moderado, tanto no benefício ambiental como no financeiro. Tal achado já era esperado, pois a comparação dos cenários não era o principal objetivo, sendo este o de

demonstrar que qualquer que seja o resultado obtido, os cenários com remanufatura são melhores que a situação atual da instituição, no que se refere ao reaproveitamento dos seus resíduos eletrônicos, no caso específico, os computadores pessoais.

A principal contribuição do modelo desenvolvido para a comunidade acadêmica é a possibilidade de avaliar os impactos ambientais e os financeiros advindos da remanufatura de computadores. Além disso, por ser um modelo aberto, ele pode ser alterado para aplicação em outros casos e tipos de organização, tornando possível novas pesquisas a partir desta já iniciada. Para os gestores de TI de outras organizações, o modelo gerado pode auxiliar no planejamento de compras e descartes de equipamentos, de modo a minimizar as perdas relativas às despesas com TICs, bem como contribuir com a sustentabilidade ambiental por meio de iniciativas de TI Verde.

Uma das principais limitações desta investigação refere-se ao fato de o modelo ter sido desenvolvido para analisar uma instituição específica, o que impede a generalização dos achados para outros tipos de organizações, embora o fato de este ser um modelo aberto torne possível a análise de novos cenários com diferentes TICs. Outra limitação refere-se à questão de não ter sido analisada a possibilidade de ganho de créditos de carbono a partir da remanufatura dos computadores.

Como trabalhos futuros, pretende-se expandir o modelo a outros equipamentos que não foram considerados neste estudo, tais como impressoras, *notebooks* e *smartphones* e também considerar na avaliação os benefícios sociais que podem ser gerados, como, por exemplo, doar parte dos computadores produzidos a instituições que não possuam esses equipamentos por não ter condições de comprá-los. Também, pretende-se incluir no modelo a variável relativa à possibilidade de ganho a partir da venda dos créditos de carbono gerados com a remanufatura de computadores.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), no âmbito do processo BEX 0004-15-4, e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) de Portugal (UID/CEC/00319/2013), pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

Referências

- ABELIOTIS, K. et al. Decision support systems in solid waste management: a case study at the national and local level in Greece. *Global NEST Journal*, v. 11, n. 2, p. 117-126, 2009.
- DAELLENBACH, H. G.; MCNICKLE, D. C. *Decision making through systems thinking*. [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2005.
- DIAS, G. F. et al. Práticas organizacionais ambientalmente corretas relacionadas com a Tecnologia de Informação: um estudo qualitativo em universidades brasileiras bem ranqueadas. In: ENCONTRO DA ANPAD – ENANPAD, 37., 2013, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Anpad, 2013.
- DYSON, B.; CHANG, N. B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management*, v. 25, n. 7, p. 669- 679, 2005.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. *Carbon footprint calculator*. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/carbon-footprint-calculator/>>. Acesso em: 14 fev. 2016.
- EUROSTAT– European Commission Statistical. *Environment in the EU27 – Recycling accounted for a quarter of total municipal waste treated in 2009*. 2011. Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_PUBLIC/8-08032011-AP/EN/8-08032011-AP-EN.PDF>. Acesso em: 16 maio 2016.
- FARIA, A. C.; MARTINS, M. S.; SIQUEIRA, L. D. TI Verde: mito ou realidade na indústria digital brasileira. In: ENCONTRO DA ANPAD – ENANPAD, 37., 2013, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Anpad, 2013.
- FERRER, G. The economics of personal computer remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 21, n. 1, p. 79-108, 1997.
- FINLAY, P. N. *Introducing decision support systems*. Oxford, UK Cambridge, Mass., NCC Blackwell; Blackwell Publishers, 1994.
- FORD, A. *Modeling the environment*. [S.l.]: Island Press, 2009.

- FROTA NETO, J. Q.; BLOEMHOF, J. M. Is remanufacturing effective and eco-efficient? An analysis of the eco-efficiency of personal computers and mobile phones. *Social Science Research Network*, 2009. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=1367023>>. Acesso em: 11 mar. 2016.
- FROTA-NETO, J. Q.; BLOEMHOF, J. M. An analysis of the eco-efficiency of remanufactured personal computers and mobile phones. *Production and Operations Management*, v. 21, n. 1, p. 101-114, 2012.
- GIUTINI, R.; GAUDETTE, K. Remanufacturing: the next great opportunity for boosting US productivity. *Business Horizon*, v. 46, n. 6, p. 41-48, 2003.
- HATCHER, G. H.; IJOMAH, W. L.; WINDMILL, J. F. C. Design for remanufacturing in China: a case study of electrical and electronic equipment. *Journal of Remanufacturing*, v. 3, n. 3, p.1-11, 2013.
- HUANG, G. H.; BAETZ, B. W.; PATRY, G. G. Trash-flow allocation: planning under uncertainty. *Interfaces*, v. 28, n. 6, p. 36-55, 1998.
- KROTH, G. L. et al. Simulação computacional para avaliação do impacto ambiental gerado pelo setor de tecnologia da informação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DA PRODUÇÃO – ENEGEP. 35., 2015, *Anais...* Fortaleza: ABEPRO, 2015.
- KUM, V.; SHARP, A.; HARNPORNCHAI, N. A system dynamics study of solid waste recovery policies in Phnom Penh city. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 23rd, 2005, Boston. *Proceedings SDS...* Boston: System Dynamics Society, 2005.
- LAW, A. M. *Simulation modeling and analysis*. 5. ed. Boston: McGraw-Hill, 2015.
- LUNARDI, G. L.; FRIO, R. S.; BRUM, M. M. Tecnologia da Informação e sustentabilidade: um estudo sobre a disseminação das práticas de TI Verde nas organizações. In: ENCONTRO DA ANPAD – ENANPAD, 35., 2011, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Anpad, 2011.
- LUNARDI, G. L.; ALVES, A. P. F.; SALLES, A. C. Desenvolvimento de uma escala para avaliar o grau de utilização da tecnologia da informação verde pelas organizações, *Revista Administração*, v. 49, n. 3, p. 591-605, 2014.
- MEIRELLES, F. 26^a *Pesquisa anual de Tecnologia da Informação*. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. 2012. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657>. Acesso em: 16 maio 2016.
- MURUGESAN, S. Harnessing Green IT: principles and practices, *IT Professional*, v. 10, n. 1, p. 24-33, 2008.
- PIDD, M. *Modelagem empresarial – ferramentas para a tomada de decisão*. Porto Alegre: Artmed, 1998.
- SAHNI, S. et al. Personal computer remanufacturing and energy savings. Technical Report. Cambridge, MA: MIT Energy Initiative Report Series, 2010.
- SCHNEIDER, J. R. et al. Simulação baseada em systems dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos eletrônicos numa instituição de ensino superior. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO – SEMEAD, 18., 2015, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Universidade de São Paulo, 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*. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas)–Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná, 2006.
- SIMONETTO, E. O.; BORENSTEIN, D. A decision support system for the operational planning of solid waste collection. *Waste Management*, v. 27, n. 10, p. 1286-1297, 2007.
- SIMONETTO, E. O. Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste – an approach using systems dynamics. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, v.13, n. 4, p. 339-353, 2014.
- SOMMERVILLE, I. *Software engineering*. [S.l.]: Pearson, 2015.
- 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, 2010.
- SUFIAN, M. A.; BALA, B. K. Modeling of urban solid waste management system: the case of Dhaka city. *Waste Management*, v. 27, p. 858-868, 2007.
- SUNDIN, E.; DUNBÄCK, O. Reverse logistics challenges in remanufacturing of automotive mechatronic devices. *Journal of Remanufacturing*, v. 3, n. 2, p. 1-8, 2013.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim simulation software*. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: 12 fev. 2016.
- ZUTSHI, A.; SOHAL, A. Environmental management systems auditing: auditors'experiences in Australia. *International Journal Environment and Sustainable Development*, v. 1, n. 1, p. 73-87, 2002.

Recebido em 18 mar. 2016 / aprovado em 23 maio 2016

Para referenciar este texto

SIMONETTO, E. O. et al. Um modelo de dinâmica de sistemas para avaliação do reaproveitamento de resíduos eletrônicos na remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 385-402, 2016.