

**Eixo Temático: Estratégia e Internacionalização de Empresas**

**AVALIAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DE E-WASTE NA REMANUFATURA DE COMPUTADORES EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR – UMA ABORDAGEM UTILIZANDO A DINÂMICA DE SISTEMAS**

**ASSESSMENT OF E- WASTE REUSE IN COMPUTER REMANUFACTURING IN AN INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION - AN APPROACH USING SYSTEMS DYNAMICS**

Eugênio De Oliveira Simonetto, Goran Putnik, Cátia Alves e Hélio Castro

**RESUMO**

O uso das Tecnologias da Informação envolve uma crescente geração de resíduos eletrônicos, pois devido à rápida inovação tecnológica ocorre que estes em um curto espaço temporal tornam-se obsoletos e têm seu ciclo de vida reduzido. O 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 através de seu reuso e remanufatura. Para a modelagem do sistema foi utilizada a metodologia de Dinâmica de Sistemas através do 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 do mesmo em submodelos, de modo a facilitar a sua experimentação e análise, para tal foram desenvolvidos três submodelos, os quais foram denominados: Aquisição/Descarte, PC Remanufaturado e Avaliação dos Benefícios.

**Palavras-chave:** Dinâmica de Sistemas, Remanufatura de Computadores, Lixo Eletrônico, Simulação Computacional, Modelagem de Sistemas.

## Introdução

O uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) pelas pessoas é um fato real, pois inclui o uso de computadores pessoais, dispositivos portáteis, impressoras até os dispositivos de comunicação. Devido às mudanças impostas pelas inovações tecnológicas, tais TICs tornam-se obsoletas 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*).

Devido a gama de problemas que o tratamento inadequado dos resíduos gera, 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 vinte anos (HUANG et al., 1998; SIMONETTO e BORENSTEIN, 2007). Ao tratar-se o desenvolvimento de modelos computacionais de apoio ao processo decisório associados às práticas de TI Verde ainda são escassos os trabalhos publicados. 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). Outros artigos analisam a questão da ecoeficiência energética e dos valores de mercado dos computadores e telefones móveis remanufaturados, assim, comparando-os com os produtos novos em tais critérios (FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2009; FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2012; SAHNI et al., 2010)

Com base nas descrições anteriores e, visando 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.

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 o mesmo. Na seção 3 é descrito o referencial teórico para o desenvolvimento do estudo, onde são 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, a validação e um experimento utilizando o modelo. Por fim, as considerações finais são apresentadas na seção 6.

## 2 Método de Pesquisa

Neste artigo, o método de pesquisa para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseado na metodologia apresentada por Law (2015) para modelagem e simulação de sistemas. Esta metodologia é constituída pelos seguintes passos: (1) estudos exploratórios em artigos científicos, relatórios técnicos, entrevistas com *stakeholders* e observações do ambiente onde os dados foram coletados. Através desses dados, o problema de pesquisa foi especificado e estruturado; (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, através de testes em laboratório e análise do comportamento histórico (com os dados que foram possíveis), 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 análise uma Instituição de Ensino Superior no Brasil, mas pode ser aplicado e estendido a outros casos, desde que as especificidades do caso sejam adicionadas e tratadas no mesmo. As etapas de desenvolvimento do modelo foram realizadas na IES pela facilidade de acesso aos dados e as pessoas que possuem conhecimento sobre o tema da pesquisa, logo, a escolha da mesma foi por conveniência. A principal justificativa para avaliar-se a extensão do ciclo de vida dos computadores pessoais é por estes ainda serem 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 que serviu de análise para o desenvolvimento e validação. Os dados com relação a valores de computadores remanufaturados e seus respectivos consumos energéticos foram extraídos de Frota-Neto e Bloemhof (2009), Frota-Neto e Bloemhof (2012) e Sahni et al. (2010). Para a definição das variáveis componentes do modelo foram realizadas entrevistas com *stakeholders* da instituição (para garantir uma maior fidedignidade ao estudo), observações do processo de aquisição e descarte por parte dos pesquisadores e pesquisa bibliográfica em artigos e relatórios técnicos (FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2009; FROTA-NETO e BLOEMHOF, 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, analisando o seu comportamento e observando quais as variáveis fazem parte do sistema (SILVA, 2006). 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, assim, quanto maior os índices de remanufatura e menor a destinação ao lixo eletrônico, otimiza-se os recursos financeiros e reduz-se as emissões de CO<sub>2</sub> ao meio ambiente.*

### 3 Referencial teórico

Para o desenvolvimento do artigo utilizou-se a simulação computacional através da Dinâmica de Sistemas para avaliação dos benefícios ambientais e financeiros da remanufatura de computadores pessoais (PCs), logo, ao longo da seção serão abordados os temas componentes do artigo.

A remanufatura é o processo de manufatura de um produto a partir de componentes que teriam seu ciclo de vida encerrado, mas que a partir desse novo processo, passam a ser matéria-prima para o mesmo. Esse novo processo perfaz 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 3 (três) novas fases ao processo de manufatura tradicional, as quais são: a remanufatura propriamente dita, o transporte

do produto remanufaturado e o tempo de vida extra que o produto adquire. Segundo os autores, o grande benefício da remanufatura está na extensão do ciclo de vida do produto, pois existe uma certeza com relação ao ciclo de vida, seja novo ou remanufaturado, é que o mesmo terá um fim.

Conforme Giutini e Gaudette (2003), ao quantificarem os benefícios da remanufatura colocam 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, pode-se poupar anualmente o equivalente a 16 milhões de barris de petróleo através desse 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 destes. Para ilustrar tal conclusão, na Tabela 1 são apresentados resultados gerados pelos mesmos autores em um estudo preliminar (FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2009).

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

<i>Tempo de Uso do Computador</i>	<i>Preço Residual (relação ao produto novo)</i>
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; LUNARDI, FRIO, SALLES, 2011; SOUZA, SILVA, 2013; MURUGESAN, 2008; LUNARDI, ALVES, SALLES, 2014).

Para a determinação do consumo de energia por PCs remanufaturados 3 (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 do mesmo, ou seja, a energia consumida é dependente da expectativa de tempo de duração do produto remanufaturado (FROTA-NETO e 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 2.

**Tabela 2 – Comparação do consumo energético dos PCs remanufaturados e novos**

	<i>Consumo similar de energia</i>	<i>Consumo de 30% a mais de energia</i>
<i>Ciclo de vida reduzido (25% do produto novo)</i>		
Nível baixo de energia na remanufatura	43,5%	52,0%
Nível alto de energia na remanufatura	116,5%	124,5%
<i>Ciclo de vida longo (100% do produto novo)</i>		
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 nos quesitos ambientais (produto consome menos energia em seu ciclo de vida), assim, neste artigo buscar-se-á avaliar e quantificar, através do desenvolvimento de um modelo computacional de simulação utilizando a Dinâmica de Sistemas, os benefícios do processo de remanufatura dos computadores pessoais.

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 quando utilizada permite aos seus usuários avaliarem as consequências de suas decisões em um horizonte temporal futuro (DAELLENBACH e MCNICKLE, 2005).

Diversos autores utilizam-se desta metodologia para a análise de questões relacionadas ao meio-ambiente e a sustentabilidade, dentre os quais pode-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 utiliza-se esta metodologia porque vai de encontro ao objetivo principal do mesmo, o qual é avaliar em um horizonte futuro de tempo as possibilidades de benefícios ambientais e econômicos da remanufatura de computadores pessoais (PCs), a partir de computadores usados, que seriam destinados à coleta de resíduos eletrônicos.

#### 4 Desenvolvimento do Modelo de Simulação

Para a definição das variáveis componentes do modelo foram utilizadas 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 aos temas remanufatura, resíduos eletrônicos e TI verde (FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2009; FROTA-NETO e BLOEMHOF, 2012; GIUTINI e GAUDETTE, 2003; SCHNEIDER et al., 2015). Na figura 2 pode ser visualizada a estruturação do modelo em submodelos. Para uma melhor estruturação do desenvolvimento, o modelo foi concebido em 3 (três) submodelos denominados: (a) Aquisição / Descarte, (b) PC Remanufaturado e; (c) Avaliação dos Benefícios, conforme pôde ser visualizado anteriormente na figura 2. Nas próximas subseções serão apresentados os submodelos e sua modelagem utilizando a Dinâmica de Sistemas.

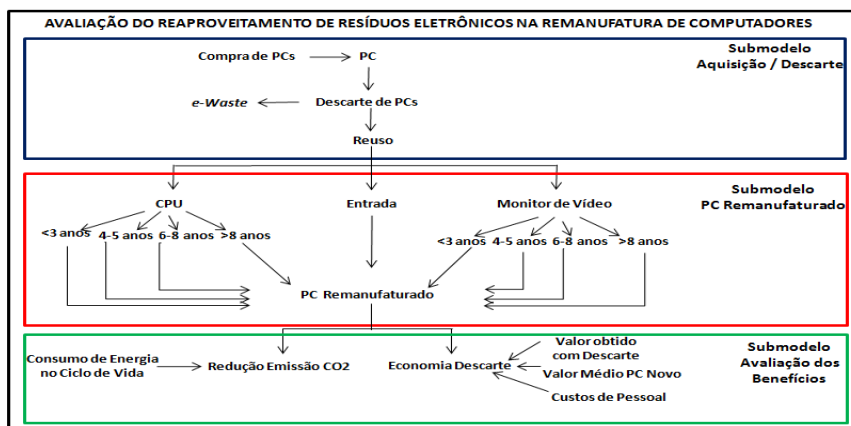


Figura 2 – Estruturação e variáveis componentes do modelo

Fonte: 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: a quantidade de computadores pessoais em uso no ambiente modelado (*PC*), a quantidade de monitores (*Monitor Reusable*), dispositivos de entradas (*InputDev Reusable*) e CPUs (*CPU Reusable*) possíveis de serem reutilizadas no processo de remanufatura, bem como, os dispositivos que não possuem condições de serem remanufaturados (*Monitor e-Waste*, *CPU e-Waste* e *InputDev e-Waste*).

As variáveis de fluxo utilizadas, bem como suas variáveis 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 possíveis de 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. Os valores atribuídos às variáveis encontram-se descritos na tabela 4.

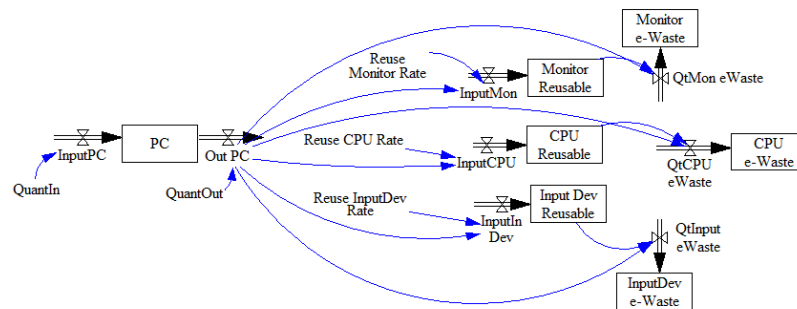


Figura 4 – Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Aquisição / Descarte

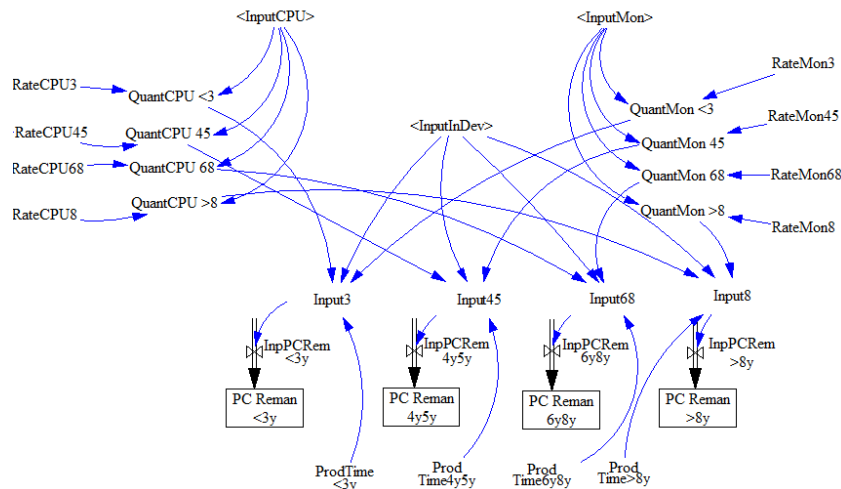
Fonte: Autores

#### 4.2 Submodelo PC Remanufurado

O submodelo PC Remanufurado 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 do 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*, devido ao fato desses componentes serem compatíveis com outros dispositivos de hardware independentes do tempo de uso. Ainda, para a definição dos dispositivos com relação ao seu tempo de uso, as variáveis de taxa *RateCPU3*, *RateCPU45*, *RateCPU68*, *RateCPU8*, *RateMon3*, *RateMon45*, *RateMon68*, *QuantMon8* foram adicionadas ao modelo, as quais 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 remanufurados 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 do processo de remanufatura (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 a 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 Remanufurado. As equações do submodelo e os valores atribuídos às variáveis são apresentados na Tabela 4.



**Figura 5 – Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo PC Remanufaturado**

Fonte: Autores

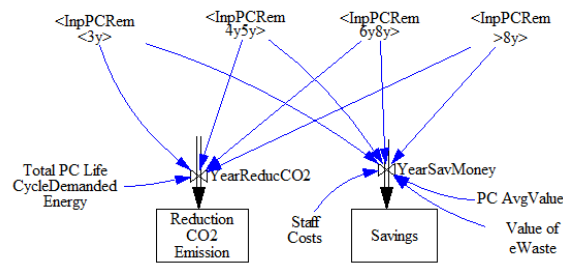
### 4.3 Submodelo Avaliação dos Benefícios

O último submodelo componente da modelagem desenvolvida é denominado Avaliação dos Benefícios, nesse, são gerados os resultados relacionados ao benefício ambiental proporcionado, no caso, a redução da emissão de CO<sub>2</sub> no ambiente e, também, o benefício financeiro gerado. No caso específico do benefício financeiro foi avaliado o ganho que pode ser obtido pela remanufatura dos computadores comparado à venda destes como resíduos eletrônicos. Ou seja, qual o valor pode obter-se a mais 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 onde 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 *TotalPCLifeCycleDemandedEnergy* 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 CO<sub>2</sub> (*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 CO<sub>2</sub> 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*), primeiramente, 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). Posteriormente, deduz-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.

As variáveis de estoque *ReductionCO2Emission* 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 tabela 4.



**Figura 6 – Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Avaliação de Benefícios**

Fonte: Autores

## 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 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 se definir 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 no mesmo e, que o mesmo 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 (VENSIM, 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 onde 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 ser considerado como zero dá-se pelo fato da instituição poder proceder a remanufatura utilizando os profissionais do setor de manutenção para tal. 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 CO<sub>2</sub>, os dados são oriundos de EPA (2016).

Para a execução da terceira fase de validação do modelo foram gerados 2 (dois) cenários, os quais serão executados no modelo, denominados: (a) Cenário Otimista e (b) Cenário Moderado. O detalhamento de ambos os cenários são apresentados na tabela 4.

Para a definição do cenário otimista levou-se em consideração os índices de reaproveitamento dos resíduos de países como a Holanda, onde trata-se como resíduo apenas 4% do total gerado 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, 2011)(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.

**Tabela 4 – Detalhamento dos cenários executados no modelo**

Taxas	Cenário	
	Otimista	Moderado
Entrada de PCs	Nos dois anos iniciais a taxa de compra atual de 340 PC/ano é mantida, posteriormente, reduz-se 10% mantendo 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 ano 2, até 40% no ano 4, até 60% no ano 6 e até 80% no ano 8. Posteriormente, mantém-se 80% até o fim.	Aumenta-se até 20% no ano 4 e mantém-se até o fim.
Reuso de CPU	Aumenta-se até 20% no ano 2, até 40% no ano 4, até 60% no ano 6 e até 80% no ano 8. Posteriormente, mantém-se 80% até o fim.	Aumenta-se até 20% no ano 4 e mantém-se até o fim.
Reuso de Dispositivo de Entrada	Aumenta-se até 20% no ano 2, até 40% no ano 4, até 60% no ano 6 e até 80% no ano 8. Posteriormente, do ano 8 ao 10 eleva-se a 90%.	Aumenta-se até 20% no ano 4 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: Autores

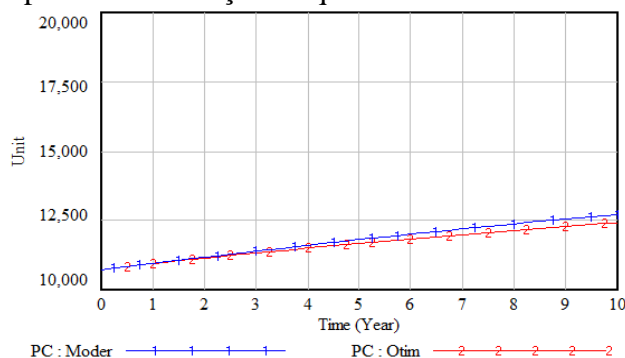
### 5.1 Experimento e resultados

Após a definição dos dois cenários para a experimentação do modelo foram executadas as simulações no simulador Vensim (VENSIM, 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 de 10 (dez) anos, porém a configuração dessa variável fica a cargo do projetista / usuário, pois a mesma depende da análise a ser feita.

Com o modelo desenvolvido diversas análises podem ser executadas e, para o artigo, foram selecionadas as que parecem ser mais relevantes para os autores e *stakeholders* da instituição que foram coletadas as informações para o desenvolvimento, 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 CO<sub>2</sub> provenientes do uso dos computadores remanufaturados. A seleção dos critérios avaliados no artigo levou em consideração a necessidade de informação dos *stakeholders*, no caso, da quantidade de computadores em uso e descartados na IES (atual e futura), bem como, foram pautados pelo objetivo da pesquisa, no caso, da quantidade possível de remanufatura e das questões financeiras e ambientais avaliadas. É importante ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, logo, toda e qualquer análise do tipo “*what if*” são 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 é no que 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 compras é maior que o número de descarte. A quantidade de aquisição nos últimos três anos diminuiu consideravelmente (hoje encontra-se entre 300 e 400 computadores / ano), mas houve anos onde esse número foi de quase 2000 computadores. Para avaliar a variável, manteve-se o número de aquisições entre 300 e 340 computadores no cenário otimista e 340 computadores no cenário moderado, porém, em ambos os cenários, elevou-se em 5% ao ano a quantidade de descartes. O resultado mostra, que ao fim de 10 anos, o número de computadores pessoais terá um crescimento de 23,17% no cenário moderado e de 20,25% no cenário otimista (onde diminui-se as compras e aumenta-se os descartes). Assim, o resultado denota a importância da instituição possuir 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.



**Figura 8 – Variação da quantidade de PCs**

Fonte: Autores

Outra análise realizada no modelo de simulação diz respeito à quantidade de dispositivos que poderiam ser reutilizados, mas que têm como destino os resíduos eletrônicos da instituição. No caso específico, foi avaliada a quantidade de CPUs descartadas, pois as mesmas possuem o maior número de componentes (placas, memórias, processadores, etc.) em sua composição. Atualmente, todas CPUs têm como destino o 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 CPU descartada (*e-waste*) no 10º ano simulado seria de apenas 36 unidades do total gerado (20,2%) no cenário otimista e 142 unidades (79,8%) no cenário moderado. A figura 9 apresenta a variação anual da quantidade descartada de CPUs comparada à quantidade que tem por destino o lixo eletrônico da instituição.

De modo a facilitar o entendimento às análises relativas ao quantitativo de computadores que poderiam ser remanufaturados, a tabela 5 apresenta o total relativo a cada grupo de classificação ao final do tempo simulado (10 anos). No cenário otimista para remanufatura dos computadores poderiam ser produzidos 659 (seiscentos e cinquenta e nove) unidades, desses, 447 seriam com

unidades descartadas após o uso, no ciclo de vida tradicional, de um período entre 6 e 8 anos. O total de computadores remanufaturados produzidos no cenário otimista representa o reaproveitamento de 46,9% do total de unidades descartadas. Logo, apesar de otimista, a quantidade remanufaturada não atinge a metade dos computadores descartados, porém é bastante elevado quando comparada à situação atual, onde todo descarte é enviado ao lixo eletrônico. Na simulação do cenário moderado, o total de computadores remanufaturados foi de 200 (duzentos) computadores, o que representa uma taxa de remanufatura de 14,2% nos dez anos simulados.

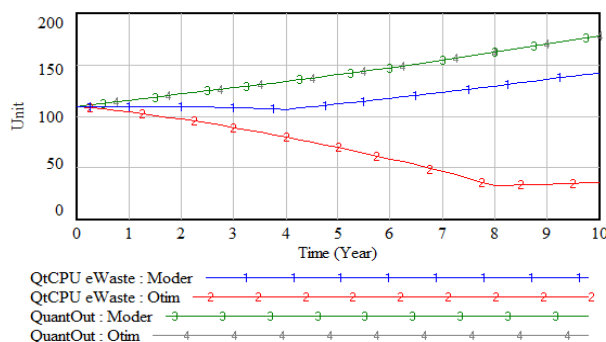


Figura 9 – Total de CPUs descartadas comparada às enviadas ao lixo eletrônico  
Fonte: Autores

**Tabela 5 – Total de computadores remanufaturados nos cenários simulados**

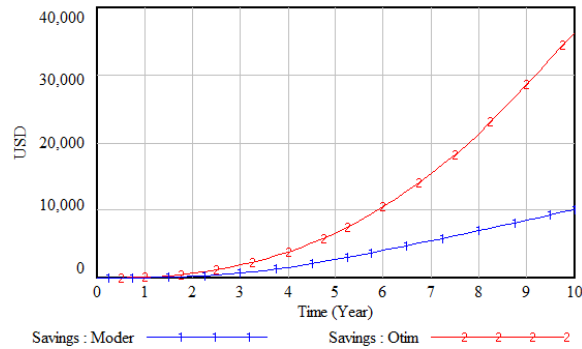
Uso dos Dispositivos	Cenário Otimista	Cenário Moderado
Menos de 3 anos	7	1
Entre 4 e 5 anos	40	5
Entre 6 e 8 anos	447	145
Mais de 8 anos	165	49
<b>Total</b>	<b>659</b>	<b>200</b>

Fonte: Autores

A próxima análise realizada diz respeito aos benefícios financeiros que podem ser gerados com a venda dos computadores remanufaturados. Para a realização 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 10º 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.

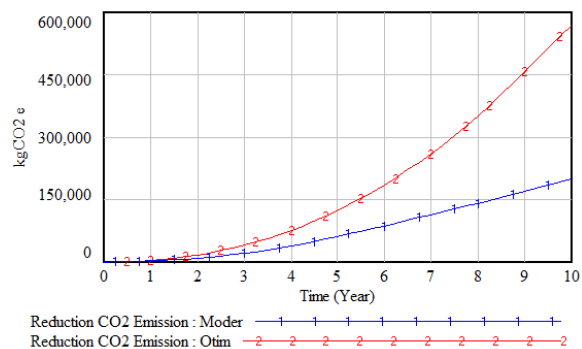
Na última das análises realizadas neste artigo avaliou-se o potencial de redução da emissão de CO2 na atmosfera a partir da remanufatura dos computadores. Esta análise parte do pressuposto que com o prolongamento do ciclo de vida de um computador o consumo de energia do mesmo é menor do que um novo, pois no ciclo de vida destes equipamentos a etapa que consome mais energia é a 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, onde verifica-se que em ambos os cenários pouco reduz-se as emissões no início do tempo simulado. No cenário otimista, quando do 10º 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, 200.000 kgCO<sub>2</sub> no mesmo período. Uma análise comparativa com a situação atual de emissão de CO<sub>2</sub> é de difícil execução, pois não se possui os dados do destino de cada equipamento após sua venda como resíduo eletrônico. Os dados totais de redução da emissão de CO<sub>2</sub> podem ser visualizados na tabela 6.



**Figura 10 – Benefício financeiro anual obtido com a remanufatura**

Fonte: Autores



**Figura 11 – Redução anual da emissão de CO<sub>2</sub> com a remanufatura**

Fonte: Autores

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

	Cenário Otimista	Cenário Moderado	Cenário Atual
Redução da Emissão CO <sub>2</sub>	569.618 kgCO <sub>2</sub> e	199.726 kgCO <sub>2</sub> e	Indefinido
Possibilidade de Ganho Financeiro	USD 36.310	USD 10.075	USD 55

Fonte: Autores

## 6 Considerações finais

O principal objetivo da pesquisa apresentada no artigo foi o desenvolvimento, verificação e validação e experimento de modelos de simulação computacional para avaliação de cenários para a remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior, onde não existe a política de reaproveitamento dos resíduos eletrônicos. Com relação à hipótese apresentada no método de pesquisa foi confirmada, pois 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, pode reduzir a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na atmosfera.

Para o desenvolvimento do modelo computacional foram utilizadas variáveis, como por exemplo, número de computadores, compras, descartes, taxa de aproveitamento de dispositivos computacionais, tempo para o processo de remanufatura dos computadores e, a partir dessas, o sistema é capaz de estimar a quantidade de computadores a serem remanufaturados e os possíveis ganhos ambientais e financeiros com o processo. A partir dos resultados gerados pela simulação os gestores institucionais poderão definir as políticas de compras e descarte dos

computadores, levando em consideração a sustentabilidade financeira e ambiental no processo decisório com relação aos custos de TICs.

No artigo 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, envio ao lixo eletrônico e de tempo de remanufatura para ambos os cenários foram criadas pelos projetistas do modelo para realização deste estudo. Cabe ressaltar que os cenários foram gerados para esse experimento, porém o modelo pode ser configurado conforme 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 os melhores resultados que o moderado, tanto no benefício ambiental como no financeiro. Tal resultado já era esperado, pois não era o principal objetivo a comparação dos cenários e, sim, demonstrar que qualquer que seja o resultado obtido, os cenários com remanufatura são melhores que a situação atual da instituição, no que refere-se ao reaproveitamento dos seus resíduos eletrônicos, no caso específico, os computadores pessoais. A principal contribuição do modelo desenvolvido para a comunidade acadêmica refere-se ao fato da possibilidade de avaliar-se os impactos ambientais e financeiros advindos da remanufatura de computadores, bem como, pelo fato deste ser aberto é permitido que seja alterado para aplicação em outros casos e tipos de organização. Assim, tornando possível novas pesquisas a partir desta já iniciada. Para os gestores de TI das 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 através de iniciativas de TI Verde.

Como trabalhos futuros pretende-se expandir o modelo a outros equipamentos que não foram considerados no 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 condições de aquisição. Também, pretende-se incluir no modelo a variável relativa a possibilidade de ganho a partir da venda dos créditos de carbono gerada com a remanufatura de computadores.

### **Agradecimentos**

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

### **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*. 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: XXXVII EnAnpad. *Anais...* Belo Horizonte, 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*. Disponível em: <[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_PUBLIC/8-08032011-AP/EN/8-08032011-AP-EN.PDF](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: XXXVII EnAnpad. *Anais...*Belo Horizonte, 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*. 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.
- GOLROUDBARY, S.R.; ZAHRAEE, S.M. System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.53, p.88–102, 2015.
- 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.
- KROTH, G.L.; SIMONETTO, E.O.; LÖBLER, M.L., GUBIANI, J.S., SCHIEFELBEIN, U. Simulação computacional para avaliação do impacto ambiental gerado pelo setor de tecnologia da informação. XXXV ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia da Produção. *Anais...* Fortaleza, ABEPRO, 2015.
- KUM, V.; SHARP, A.; HARNPORNCHAI, N. A System Dynamics Study of Solid Waste Recovery Policies in Phnom Penh City. 23rd International Conference of the System Dynamics Society, *Proceedings SDS..*, Boston, 2005.
- LAW, A.M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5Ed., 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. XXXV EnAnpad – EnAnpad, *Anais...* Rio de Janeiro, 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. 26ª. *Pesquisa anual de Tecnologia da Informação*. Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_publicacao/253\\_publicacao02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf) . Acesso em: 16 mai. 2016.
- MURUGESAN, San. Harnessing Green IT: Principles and Practices, *IT Professional*, v. 10, n.1, p. 24-33, 2008.
- PARKES, O.; LETTIERI, P.; BOGLE, D.L. Life cycle assessment of integrated waste management systems for alternative legacy scenarios of the London Olympic Park. *Waste Management*, v.40, p.157–166, 2015.

- PIDD, M. *Modelagem Empresarial – Ferramentas para a Tomada de Decisão*. Porto Alegre: Artmed, 1998.
- SAHNI,S., BOUSTANI, A., GUTOWSKI, T., GRAVES, S. Personal Computer Remanufacturing and Energy Savings. Technical Report, *MIT Energy Initiative Report Series*, 2010.
- SCHNEIDER, J.R., ZWICKER, A.M.; BELTRAME, G.; SIMONETTO, E.O. Simulação baseada em systems dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos eletrônicos numa instituição de ensino superior. XVIII SemeAd, *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. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.
- 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*. 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, 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.