

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE COMPUTADORES DESKTOP
CONSIDERANDO DIFERENTES MONITORES E CENÁRIOS DE
FIM DE VIDA**

RICARDO BARBOSA SCALABRINI

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE COMPUTADORES DESKTOP
CONSIDERANDO DIFERENTES MONITORES E CENÁRIOS DE
FIM DE VIDA**

RICARDO BARBOSA SCALABRINI

ORIENTADOR: PROF^a. DR^a. SANDRA MARIA DA LUZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM. DM 291/2018

BRASÍLIA/DF: AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE COMPUTADORES DESKTOP
CONSIDERANDO DIFERENTES MONITORES E CENÁRIOS DE
FIM DE VIDA**

RICARDO BARBOSA SCALABRINI

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

APROVADO POR:



Prof.^a Dr.^a Sandra Maria da Luz (Faculdade do Gama/UnB)
(Orientadora)

Prof. Dr.^o Armando Caldeira Pires (Departamento de Engenharia Mecânica/UnB)
(Examinador interno)

**Prof. Dr.^o Thiago Oliveira Rodrigues (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e
Tecnologia – IBICT)**
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 07 DE AGOSTO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SCALABRINI, RICARDO BARBOSA

Avaliação de Ciclo de Vida de Computadores Desktop Considerando Diferentes Monitores e Cenários de Fim de Vida. [DISTRITO FEDERAL] 2018. xiv, 113 p., 210 x 297 mm (ENMC/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2018).

Dissertação de Mestrado Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Computadores Desktop	2. Cenários de fim de vida
3. Reuso e reciclagem	4. Uso de água e Energia
I. ENM/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SCALABRINI, RICARDO BARBOSA (2018). Avaliação de Ciclo de Vida de Computadores Desktop Considerando Diferentes Monitores e Cenários de Fim de Vida. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM – DM 291/2018. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 113 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ricardo Barbosa Scalabrini

TÍTULO: Avaliação de Ciclo de Vida de Computadores Desktop Considerando Diferentes Monitores e Cenários de Fim de Vida.

GRAU: Mestre

ANO: 2018.

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

 _____

Ricardo Barbosa Scalabrini
ricardo.scalabrini@ifg.edu.br

*“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo.
Todos nós sabemos alguma coisa.
Todos nós ignoramos alguma coisa.
Por isso aprendemos sempre.”*

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelas graças concedidas, principalmente o dom da vida e da saúde física e mental para concluir o presente trabalho;

A meus pais, Maria Aparecida e Sebastião, pelo amor, compreensão e amizade.

A minha esposa Nilvânia, minhas filhas Maryanna, Isadora e Vallentina, pelo amor e carinho, pelos vários momentos que sentiam minha falta e mesmo assim contribuíram para que eu concluísse a pesquisa, Amo vocês!

A minha orientadora Sandra Maria da Luz, pela paciência, confiança, incentivo, pelas palavras e ações construtoras que transmitiram fé e tornaram possível a conclusão dos trabalhos.

A professora e “co-orientadora”, Rosineide (Rose), pelo incentivo e experiências transmitidas através dos conselhos e orientações.

Ao colega Vitor Magalini pelo importante auxílio frente as dúvidas com o *software* e a dissertação.

Aos Professores Armando Caldeira Pires, Thiago Oliveira Rodrigues e Mário Baptista Siqueira, que aceitaram o convite para fazerem parte desta banca e contribuírem para a ampliação da minha visão “Acvista”.

A Thinkstep pela cessão do GaBi *Software* utilizado em todo o trabalho e a Ecoinvent pelo acesso ao banco de dados.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, pela confiança, incentivo e apoio financeiro através da bolsa de estudos PIQS.

Obrigado a todos!

RESUMO

As inovações tecnológicas vinculadas aos produtos eletroeletrônicos, atualmente, trazem a preocupação relacionada ao meio ambiente ocasionada pelo fim de vida dos computadores. A cada inovação o tempo de vida tende a encurtar proporcionando o descarte, muitas vezes prematuro e sem qualquer tratamento ou controle, que associado a potencialização do consumo de insumos para a produção obtém como resultado a geração de impactos ambientais. Com o objetivo de conhecer a magnitude dos impactos associados aos computadores é necessário o estudo do seu ciclo de vida usando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Nesse estudo foi feita a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) com base em padrões internacionais da ISO 14040 e diretrizes de *Ecodesign*, aplicados ao computador desktop, composto pelo gabinete e o monitor de cristal líquido (LCD) ou o de tubo de raio catódico (CRT) todos de 17 polegadas. Essas tecnologias foram comparadas como forma de apurar a efetividade da aplicação da tecnologia sobre a redução de massa de insumos para fabricação e redução de uso energético e de água para a utilização de equipamentos com a mesma função. O modelo de ACV foi construído com o *software* GaBi 7.3 *Education*®, utilizando o método CML 2001 para as categorias de aquecimento global, depleção abiótica, potencial de eutrofização e potencial de acidificação, e caracterizada como de berço ao túmulo (*cradle-to-grave*). O inventário foi modelado com dados secundários na literatura e com a base de dados EcoInvet 3.4, não considerando o mouse, teclado e as embalagens. O ciclo de vida do computador iniciou-se com a produção na China sendo distribuído e posteriormente usado e disponibilizado no fim de vida no Brasil. Como forma de sugerir ações mitigatórias foram modelados o Cenário de Referência caracterizado como ciclo de vida normal até o descarte e dois outros cenários, o de reuso (Cenário (1)) e o de reciclagem (Cenário (2)) para o fim de vida, alternados entre os dois tipos de monitores. No Cenário de Referência, as fases de produção e de uso apresentaram os maiores impactos, emissões e uso de água e de energia em contraste com a fase de distribuição. Nesse estudo foram identificadas algumas peças que contribuíram de forma maior para os resultados de impactos obtidos, como o disco rígido, fonte de alimentação e, principalmente, as placas de circuito impresso. No Cenário (1) foi estendido o tempo de vida em dois anos e aumentada sua capacidade de processamento o que elevou o uso de energia e gerou novos impactos que quando equalizados pelo novo tempo de vida obteve-se a redução dos mesmos por evitar novas extrações. No Cenário (2) foram assumidos os percentuais de reciclagem para cada conjunto de materiais presentes no gabinete e nos monitores, as reduções dos impactos obtidos nesse cenário foram superiores do que as reduções dos impactos do Cenário (1). As ações de reutilização e reciclagem foram conclusivas como relevantes, uma vez que reduziram os impactos ambientais. Para o Cenário de Referência e o Cenário (1) o computador com monitor LCD foi apontado como o menos prejudicial ao meio ambiente. Para o Cenário (2) o computador e as duas opções de monitores sofrem alterações divergentes nas categorias de impacto e nos usos de água e de energia. Ao final da avaliação foram modelados Cenários de Sensibilidade para o Cenário de Referência e o Cenário (2) e analisados para garantir a robustez dos dados.

Palavras-chave: Computador Desktop, Uso da água e da Energia, Eletroeletrônicos, Cenário de fim de vida.

ABSTRACT

The technological innovations related to electrical and electronic products currently bring environmental concerns related the disposal of computers. With each innovation the life span tends to shorten, providing often premature, uncontrolled disposal of equipment despite the lack of treatment of this material that, associated with the potentializing of the production input of consumption results in environmental impacts. In order to know the magnitude of the impacts associated to the computers it is necessary to study their life cycle using the Life Cycle Assessment (LCA). In this study, the Life Cycle Assessment (LCA) was performed based on international standards of ISO 14040 and Ecodesign guidelines applied to the desktop computer, composed of the cabinet and liquid crystal display (LCD) or cathode ray tube (CRT) all 17 inches. These technologies were compared as a way to determine the effectiveness of the application of technology on the reduction of mass of inputs for manufacturing and reduction of energy and water use for the use of equipment with the same function. The LCA model was constructed using the GaBi 7.3 Education © software via the CML 2001 method for the categories of global warming, abiotic depletion, eutrophic potential and acidification potential, and characterized as cradle-to-grave. The inventory was modeled with secondary data in the literature and with the database Ecoinvent 3.4, not considering the mouse, keyboard and the packages. The computer life cycle began with the production in China being distributed and later used and made available at the end of life in Brazil. As a way of suggesting mitigating actions, the Reference Scenario was characterized as a normal life cycle until the discard and two other scenarios, the reuse (Scenario (1)) and the recycling scenario (Scenario (2)) for the end of life, alternating between the two types of monitors. In the Reference Scenario, the production and use phases presented the greatest impacts, emissions and use of water and energy in contrast to the distribution phase. In this study, pieces were identified as playing a significant part in the impacts observed, such as hard disk, power supply and mainly printed circuit boards. In Scenario (1) the life span was extended in two years and its processing capacity was increased, which elevated the energy consumption and generated new impacts that, when equalized by the new life span resulted in the avoidance of new extractions. In Scenario (2) the recycling percentages were assumed for each set of materials present in the cabinet and in the monitors, the reductions of the impacts obtained in this scenario were higher than the reductions of the impacts of the Scenario (1). For the Reference Scenario and the Scenario (1) the computer with LCD monitor was pointed out as the least harmful to the environment. For Scenario (2), the computer and the two monitor options are subject to divergent changes in impact categories and water and energy uses. At the end of the evaluation, the Sensitivity Scenarios for the Reference Scenario and the Scenario (2) were modeled and analyzed to ensure the robustness of the data.

Keywords: Computer Desktop, Water and Energy Use, Electronics, End of Life Scenario.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	15
<u>1.1 – OBJETIVO GERAL</u>	17
<u>1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u>	17
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
<u>2.1 – CONSTITUIÇÃO E FUNCIONALIDADE DE COMPUTADORES</u>	18
<u>2.2 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS COMPUTADORES E SEUS IMPACTOS</u>	20
<u>2.3 – ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E SUA APLICAÇÃO A ELETROELETRÔNICOS</u>	24
<u>2.3.1 – Definição e estrutura da ACV</u>	24
<u>2.3.2 – Definição de objetivo e escopo da ACV</u>	26
<u>2.3.3 – Inventário de ciclo de vida - ICV</u>	27
<u>2.3.4 – Avaliação de impacto de ciclo de vida – AICV</u>	28
<u>2.3.5 – O uso da água e da energia para a produção de eletroeletrônicos</u>	30
<u>2.3.6 – Interpretação</u>	33
<u>2.3.7 – Análise de sensibilidade</u>	33
3 – METODOLOGIA.....	34
<u>3.1 – DEFINIÇÕES DO OBJETIVO E ESCOPO.....</u>	34
<u>3.1.1 – Unidade funcional</u>	34
<u>3.1.2 – Definição das fronteiras do sistema.....</u>	34
<u>3.1.3 – LEVANTAMENTO e análise de inventário de ciclo de vida (AICV)</u>	36
<u>3.1.4 – Modelagem com o <i>software</i> GaBi.....</u>	40
<u>3.2 – CARACTERIZAÇÕES DAS FASES E CENÁRIOS</u>	40
<u>3.2.1 – A Fase de produção</u>	40
<u>3.2.2 – A Fase de distribuição</u>	41
<u>3.2.3 – A Fase de uso</u>	41
<u>3.2.4 – A Fase de fim de vida.....</u>	42
<u>3.2.4.1 – O Descarte</u>	43
<u>3.2.4.2 – O Reuso</u>	43
<u>3.2.4.3 – A Reciclagem</u>	43
<u>3.3 – A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</u>	45
<u>3.4 – AVALIAÇÕES DOS IMPACTOS AMBIENTAIS</u>	45

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
<u>4.1 – IMPACTOS AMBIENTAIS DOS CENÁRIOS DE REFERÊNCIA.....</u>	<u>47</u>
<u>4.2 – COMPARAÇÕES ENTRE OS CENÁRIOS DE FIM DE VIDA</u>	<u>59</u>
<u>4.2.1 – O Reuso</u>	<u>60</u>
<u>4.2.2 – A Reciclagem</u>	<u>62</u>
<u>4.2.2.1 – Cenário (2) LCD comparado ao Cenário de Referência LCD.....</u>	<u>63</u>
<u>4.2.2.2 – Cenário (2) CRT comparado ao Cenário de Referência CRT</u>	<u>66</u>
<u>4.3 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....</u>	<u>67</u>
5 – CONCLUSÕES.....	72
6 – RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A: INVENTÁRIO COMPLETO DO GABINETE.....	84
APÊNDICE B: INVENTÁRIO COMPLETO DO MONITOR CRT 17”.....	96
APÊNDICE C: INVENTÁRIO COMPLETO DO MONITOR LCD 17”	102
APÊNDICE D: FLUXOGRAMAS	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média de materiais em eletroeletrônicos (Adaptada de CORTI, 2010).....	19
Tabela 2 – Tempo de vida de gabinetes e monitores (adaptada de ANDRAE, 2010).	21
Tabela 3 – Dados do inventário da produção do Gabinete, adaptado de SONG <i>et al.</i> , 2013.	37
Tabela 4 – Dados do inventário da produção do Monitor CRT 17”, adaptado de SONG <i>et al.</i> , 2013.	38
Tabela 5 – Dados do Inventário da produção do Monitor LCD 17”, adaptado de SONG <i>et al.</i> , 2013.	39
Tabela 6 – Massa e percentual de material reciclável em Desktops, Monitores LCD e CRT, adaptado de JÖNBRINK <i>et al.</i> , 2007.	44
Tabela 7 – Impactos ambientais para o Cenário de Referência CRT e LCD.	51
Tabela 8 – Emissões do Cenário de Referência CRT e LCD.	52
Tabela 9 – Impactos e consumos de água e de energia na fase de distribuição do Cenário de Referência.	57
Tabela 10 – Impactos e uso de água e de energia com adição do Reuso – Comparação entre o Cenário de Referência com o Cenário (1).	60
Tabela 11 – Impacto e uso de água e de energia com a equalização do novo tempo de vida para o Ciclo do Cenário (1) comparado ao Cenário de Referência.	62
Tabela 12 – Comparações da emissões entre Cenário de Referência e Cenário (2) para CRT e LCD.	63
Tabela 13 – Impactos e uso de água e energética comparados entre o Cenário de Referência LCD e Cenário (2) LCD.	64
Tabela 14 – Impactos e uso de água e de energia comparados entre o Cenário de Referência CRT e Cenário (2) CRT.	66
Tabela 15 – Resultados da Análise de Sensibilidade para os diferentes Cenários de Sensibilidade.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).....	25
Figura 2 – Fluxograma de um Inventário do Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).	27
Figura 3 – Estrutura das categorias de impacto (LEÃO, 2016).....	29
Figura 4 – Matriz Energética Brasileira de 2016 (BEN, 2017).	31
Figura 5 – Matriz Energética Chinesa de 2017 (IEA, 2017).	32
Figura 6 – Fronteiras do sistema de computadores de mesa.	35
Figura 7 – Impactos ambientais por fase do ciclo de vida do Cenário de Referência LCD e CRT.	47
Figura 8 – A) Contribuintes dos impactos do Cenário de Referência CRT – Fase de uso; B) Contribuintes dos impactos do Cenário de Referência LCD - Fase de produção.	54
Figura 9 – Impactos ambientais e uso de água e de energia da fase de produção relativos ao ciclo de vida total do Cenário de Referência.	56
Figura 10 – Impactos ambientais e uso de água e de energia na fase de uso relativos ao ciclo de vida total do Cenário de Referência.	58
Figura 11 – Cenário de Referência CRT - Ciclo de vida do computador com Monitor CRT 17".....	112
Figura 12 – Cenário de Referência LCD - Ciclo de vida do computador com Monitor LCD 17".....	113

LISTA DE SÍMBOLOS QUÍMICOS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS: Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV: Avaliação do Ciclo de Vida
Ag: Prata
AICV: Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
Amônia: NH_3
Au: Ouro
 BaSO_4 : Sulfato de bário
 CaCl_2 : Cloreto de cálcio
 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: Nitrato de cálcio
CD: *Compact Disc* (Disco compacto)
CDC: Centro de Distribuição de Carga
CRC: Centro de Recondicionamento de Computadores
CRT: *Cathodic Ray Tube* (Tubo de raio catódico)
CPU: *Central Processing Unit* (Unidade central de processamento)
Cu: Cobre
DAF: Depleção Abiótica Fóssil
DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO: Demanda Química de Oxigênio
DVD: *Digital Versatile Disc* (Disco digital versátil)
EEE: Equipamentos Eletroeletrônicos
Fe: Ferro
GaBi: *Ganzheitlichen Bilanzierung* (Contabilidade Holística)
GEE: Gases de Efeito Estufa
GLO: Global (Nação da base de dados GaBi)
GWP: *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)
 H_2SO_4 : Ácido sulfúrico
HCl: Ácido clorídrico
HF: Ácido fluorídrico
ICV: Inventário do ciclo de vida

IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

ILCD: *International Reference Life Cycle Data System* (Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida)

LCD: *Liquid Crystal Display* (Tela de cristal líquido)

Mo: Molibdênio

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$: Bórax ou Borato de Sódio

NH_4^+ : íon amônio

NO_x : Óxidos de nitrogênio

PA: Potencial de Acidificação

Pb: Chumbo

Pd: Paládio

PC: *Personal Computer* (Computador pessoal)

PCB: *Printed Circuit Board* (Placa de circuito impresso)

PCI: Placa de Circuito Impresso

PE: Potencial de Eutrofização

PO_4^{3-} : íon fosfato

PTH: Potencial de Toxicidade Humana

REEE: Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos

Sb: Antimônio

SO_2 : Dióxido de enxofre ou óxido sulfuroso

UV: Ultravioleta

WEEE: *Waste Electrical and Electronic Equipment* (Resíduos de equipamento elétrico e eletrônico)

WWW: *World Wide Web* (Rede Mundial de Computadores)

Zn: Zinco

1 – INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletroeletrônicos estão cada vez mais presentes no dia-a-dia em todos os ambientes da sociedade. Nas últimas décadas, a demanda por produtos eletrônicos, principalmente de fabricação chinesa e indiana, cresceram surpreendentemente e suas indústrias voltaram-se ao mercado doméstico. Tais produtos são usados principalmente como dispositivos de comunicação, agendas, calendários de compromissos e até mesmo como controladores de tempo e afazeres domésticos. No setor industrial, estão presentes desde o “chão de fábrica”, controlando os fluxos de serviços e a montagem dos produtos, até o controle das suas saídas. Para o comércio e prestação de serviços, seu uso é comum no controle de estoque, vendas e controle das atividades de faturamento e mão de obra. Nas instituições de ensino, além do trabalho administrativo, esses aparelhos são considerados como ferramentas facilitadoras de aprendizagem, onde muitos alunos têm seu primeiro contato dentro da sala de aula.

O micro-computador, também conhecido como computador de mesa ou *desktop*, é um dispositivo eletrônico composto por um gabinete e um monitor. Ao gabinete são usualmente adicionados pequenos dispositivos periféricos que garantem a entrada, o registro e a saída dos dados a serem processados, ou seja, garantem a funcionalidade global da máquina. Um dispositivo muito comum, que é apresentado com muitos opcionais de tecnologia, é o monitor, responsável pela apresentação dos resultados desse processamento.

Essas tecnologias, de muitas formas inovadoras, estão intimamente ligadas à produção desses equipamentos, as quais demandam grande consumo de energia, de água e de uma enorme diversidade de matérias-primas. Dentre os materiais estão presentes alguns exemplos de minérios raros, de metais pesados, alguns metais preciosos e várias substâncias perigosas como o chumbo, o arsênio, o mercúrio, o cádmio entre outros.

Para a produção dos monitores de tubo de raios catódicos é empregada uma tecnologia que consome muita eletricidade. Para os monitores LCD, a tecnologia utilizada oferece baixo consumo elétrico e grande potencial de visualização nas telas. Nos gabinetes, as mudanças tecnológicas são visíveis. Houve consideráveis evoluções dos dispositivos anexos, desde os manipuladores de fitas magnéticas, avançando para os leitores e gravadores de disquetes 5 ¼” para, posteriormente, chegar aos dispositivos óticos como o Compact Disc (Disco Compacto ou CD) e o Digital Versatile Disc (Disco Digital Versátil

ou DVD) e, finalmente, aos atuais armazenamentos externos como os *pen drives* (canetas para o armazenamento) e os cartões secure digital (cartões digitais seguros ou cartões SD).

As inovações tecnológicas trazem tanto parcelas de benefícios quanto de malefícios. Os benefícios se relacionam às atualizações do hardware e do software, tornando o processamento mais robusto, seguro e com capacidade aumentada. Já no que se refere ao visual, a tendência modernista é sempre o padrão perceptível exteriormente. Quanto aos malefícios, o rápido descarte do computador é o mais preocupante. Mesmo que suas funções ainda tenham eficiência e o seu tempo de vida ainda não tenha chegado ao fim, muitas vezes ele é descartado como consequência de uma atualização visual mais moderna.

O tempo de vida de um equipamento pode ser associado ao termo conhecido como obsolescência programada. Tal termo pode ser entendido como o ato de deixar como obsoleto algo, alguma coisa, ainda com tempo de utilidade inconcluso. A obsolescência varia bastante entre diferentes regiões e é influenciada tanto pelo poder econômico da sociedade quanto pelas ofertas de inovações físicas e tecnológicas reforçando o descarte temporal.

A crescente conscientização da importância da preservação do meio ambiente leva a preocupação com fatores como o descarte prematuro, o uso de água e de energia, e das quantidades de minérios extraídos. Os impactos ambientais associados a referidos fatores podem ser facilmente medidos utilizando a ferramenta de avaliação do ciclo de vida (ACV). Esta ferramenta pode contribuir para a melhoria e preservação ambiental face aos potenciais impactos ambientais associados aos produtos manufaturados durante toda a sua cadeia produtiva, ou seja, desde a extração dos recursos até o fim de sua vida funcional.

Com a ACV pode-se identificar lacunas nos processos de um sistema, nas quais as diretrizes de *Ecodesign* como a reciclagem, o reuso de materiais, seleção de materiais atóxicos, adoção de fontes de energia limpa, melhoria das técnicas de manufatura e logística de distribuição podem auxiliar na formulação de práticas mitigatórias reduzindo os potenciais impactos ambientais.

O estudo realizará uma avaliação do ciclo de vida (ACV) do berço ao túmulo (*crade-to-grave*) de um computador de mesa e a comparação de duas opções de monitores, o de tubo de raio catódico (CRT) e o de cristal líquido (LCD). O objetivo principal deste trabalho está em avaliar impactos ambientais a partir de diferentes cenários de fim de vida.

Sendo um cenário para a referência abrangendo o descarte, e outros dois cenários com o reuso e a reciclagem do equipamento.

Os resultados desse trabalho refletem os esforços na busca de conhecimento dos potenciais impactos ambientais e o uso de água e de energia em todo o ciclo de vida dos computadores com a comparação entre os monitores CRT de 17” e LCD de 17”. Com isso sugerir alterações dentro dos processos, principalmente na fase fim de vida para a minimização desses impactos e consumos, como forma de ajuda na garantia da continuidade do uso das tecnologias computacionais com melhorias do desempenho ambiental realçando a preservação ambiental.

Os computadores junto aos monitores assumidos como objeto desse estudo, visam mostrar a evolução tecnológica empregada associada a massa dos materiais gastos para a fabricação, ao peso dos mesmos associados ao transporte e também a utilização de energia elétrica para o uso dos equipamentos. Com isso podemos analisar a efetividade do emprego da simplicidade dos produtos conservando as mesmas funções, a redução do consumo energético, validar uma maior durabilidade, dentre outras ações que estão ligadas às diretrizes de Ecodesign.

1.1 – OBJETIVO GERAL

Este estudo tem por objetivo a avaliação do impacto ambiental através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do computador de mesa – *desktop* e monitores LCD e CRT com a caracterização de berço ao túmulo. Neste modelo serão avaliados diferentes cenários de fim de vida (descarte, reciclagem e reuso) e também a análise de sensibilidade do sistema.

1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do gabinete *desktop*, monitor CRT e monitor LCD, levando em consideração o maior número possível de informações;
- Avaliar três modelos diferentes de cenários de fim de vida: Cenário de Referência, Cenário de Reuso e Cenário de Reciclagem;
- Analisar a sensibilidade do sistema considerando alterações de variáveis de entrada, como a distância do trajeto na fase de distribuição e o mix energético das fases de produção e de uso.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – CONSTITUIÇÃO E FUNCIONALIDADE DE COMPUTADORES

O uso de computadores cresce a cada ano em um ritmo acelerado impulsionado pelas mudanças sociais e tecnológicas, sendo comum em famílias, em instituições empresariais, em organizações, no governo e no setor comercial (SONG *et al.*, 2013). As indústrias de equipamentos elétricos e eletrônicos apresentaram crescimento de 20% na produção e 8% no faturamento em 2017 (ABINEE, 2017).

A produção de equipamentos eletrônicos, como computadores, televisores e celulares, demanda por metais dos quais muitos são valiosos (ouro, prata e paládio), outros tóxicos e perigosos (mercúrio, cádmio, arsênio e flúor), e outros como os metais especiais (ferro, cobre e níquel), que quando dispostos em ambientes, onde não existe o devido controle, podem provocar efeitos de acidez ao meio ambiente e conseqüentemente afetar os animais, as plantas e a vida humana (CORTI, 2010). Retardantes de chama como o pentabromofenol e os polibromados, bem como outros produtos mais complexos como o tântalo, usados em capacitores, são também utilizados na confecção dos componentes (TSYDENOVA *et al.*, 2011; ARAÚJO, 2013; CHANCEREL *et al.*, 2014). Além disso, a água e a energia estão presentes em grande quantidade e são consumidas em todas as fases do ciclo de vida dos computadores e monitores (ARAÚJO *et al.*, 2012).

Os *desktops* necessitam de vários dispositivos periféricos como um monitor externo, um teclado e um mouse para executarem aplicativos com diversas funcionalidades domésticas e de escritório (JÖNBRINK *et al.*, 2007).

O computador tem como função básica a execução de instruções designadas por programas que são armazenados em memórias (STALLINGS, 2010). É uma máquina programável via entrada de dados, nos quais são processados e armazenados para reutilização. Para desempenhar suas funções, o computador necessita de alguns dispositivos menores que são: a placa mãe, o disco rígido, a unidade de CD / DVD, o pente de memória, o processador e a fonte de alimentação (CAPRON, 2009).

Em termos tecnológicos, os monitores CRT e LCD são distintos. A tecnologia CRT, já existente há alguns anos no mercado, é considerada madura. Usa altas tensões elétricas para aceleração de elétrons através de cátodos na direção de uma tela de vidro coberta com fósforo e uma máscara de sombra metálica perfurada para a conversão de energia cinética dos elétrons em luz, gerando assim a imagem a ser exibida (SOCOLOF *et al.*, 2005).

A tecnologia do monitor LCD é mais recente. Funciona basicamente pela composição de duas placas de vidro que cobrem o cristal líquido, filtrante de luz externa, controlando a cor e o brilho em orifícios individualizados e denominados de pixels. Em cada pixel existem transistores controladores de corrente elétrica, que quando polarizados e em contato com uma camada de poliimida permitem a passagem de luz, formando a imagem (SOCOLOF *et al.*, 2005).

Conforme Jönbrink *et al.* (2007), os modos de operação dos conjuntos operacionais, computador e monitor, podem ser o modo ativo ou o stand-by. No modo ativo a máquina está conectada a uma fonte de energia e produz imagens cujo fluxo energético de alimentação é maior; já no stand-by, modo de “espera”, o uso de energia em partes essenciais é baixo e não há a emissão de imagens. Embora haja o uso de energia nos dois estados de operação, há discrepância nos valores consumidos pelos diferentes modos.

Na estrutura da composição física de um computador existem vários componentes eletrônicos com uma única finalidade: o processamento de dados para a conversão em informação e posterior apresentação ou arquivamento. Dentre os componentes, estão os capacitores que juntos aos resistores, aos transistores e aos circuitos integrados são soldados às placas de circuitos integrados (ARAUJO, 2013). Eles são essenciais ao funcionamento e controle das funções dos equipamentos eletrônicos.

A Tabela 1 mostra a composição média de alguns materiais em aparelhos eletrônicos.

Tabela 1 – Composição média de materiais em eletroeletrônicos (Adaptada de CORTI, 2010).

	Percentual em relação ao peso				Parte por milhão		
	Fe	Al	Cu	Plásticos	Ag [ppm]	Au [ppm]	Pd [ppm]
Peças / Partes							
Placa de monitor	30%	15%	10%	28%	280	20	10
Placa de Computador	7%	5%	18%	23%	900	200	80
Telefone móvel	7%	3%	13%	43%	3000	320	120
Áudio Portátil	23%	1%	21%	47%	150	10	4
DVD	62%	2%	5%	24%	115	15	4
Calculadora	4%	5%	3%	61%	260	50	5

A Tabela 1 mostra que os produtos eletrônicos possuem muitos materiais, entre eles metais nobres e especiais, que podem ser reciclados e que consomem recursos naturais em sua produção.

Para a confecção dessas placas há o uso de água e de energia, além do uso de substâncias perigosas (SEABRA, 2012). Essas placas utilizam alguns recursos naturais para sua fabricação como os metais, que ao final da vida útil, se desperdiçados, podem contaminar o solo e a produção agrícola em suas proximidades gerando impactos ambientais prejudiciais, caso não haja uma disposição final adequada como o reuso ou a reciclagem (ARAÚJO, 2013).

2.2 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS COMPUTADORES E SEUS IMPACTOS

Conforme mencionado anteriormente, a produção de computadores demanda uma grande diversidade de materiais que possuem substâncias tóxicas (RAMESH-BABU *et al.*, 2007). No entanto, os computadores possuem uma quantidade expressiva de componentes valiosos que não estão limitados ao ferro, aço e alumínio, mas também possuem cobre, butadieno preto e branco, placas de policarbonato, placas de circuitos impressos (PCIs), unidades de processamento (CPU), módulos de memória, discos rígidos, plásticos e peças diversas (RAZI, 2016).

No Brasil, a Lei 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos, identifica os agentes geradores, as responsabilidades, as técnicas de gestão entre outros termos ligados aos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Na lei existe a caracterização da disposição final adequada como a distribuição dos rejeitos em aterros, a reciclagem, a reutilização, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, como boas práticas de gestão. Porém, ao longo desses anos a lei foi flexibilizada em razão da “impossibilidade” da adequação dos agentes responsáveis pelo seu cumprimento. Com isso, ainda se vê os dispositivos e demais periféricos eletroeletrônicos expostos ao meio ambiente, o que pode provocar a liberação de materiais nocivos ao solo, à água e ao ar (ARAÚJO, 2013).

Os computadores de mesa são tidos como obsoletos à medida que os consumidores se interessam pela computação móvel, como acontece com muitos modelos de computadores, dentre eles, o modelo *desktop* (RAZI, 2016). Atualmente os computadores passam por mudanças tecnológicas cada vez mais rápidas, fazendo com que o tempo de vida útil se torne uma variável a ser observada no estudo de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV.

O tempo de vida dos computadores, a cada avanço tecnológico, é abreviado pelo aumento do poder econômico dos usuários, pelas volumosas ofertas com grandes inovações tecnológicas e de design (obsolescência programada). O tempo de vida dos

eletrônicos varia entre as regiões (ANDRAE *et al.*, 2010). A Tabela 2 demonstra o tempo de vida de alguns equipamentos e suas localizações.

Tabela 2 – Tempo de vida de gabinetes e monitores (adaptada de ANDRAE, 2010).

Dispositivos, Região	Tempo vida útil (anos)
PC e monitor CRT, Europa	3,0
PC e monitor CRT, Coreia do Sul	4,0
Média do Tempo Vida	3,5
PC e monitor LCD, Europa	6,0
PC e monitor LCD, Suíça	4,0
Média do Tempo Vida	5,0

Quando comparados a outros equipamentos elétricos e eletrônicos, na maioria das vezes, esse tempo é refletido não somente pelo desgaste dos componentes mas também pelo mercado que força a substituição por considerarem os atuais como obsoletos ou desatualizados ou por não apresentarem as inovações e, portanto, não acompanharão as mudanças tecnológicas (PUCA *et al.*, 2017).

Com o tempo de vida reduzido, forçado muitas vezes pelo mercado de eletroeletrônicos, a substituição desses equipamentos tende a se apresentar inevitável. Para Dwivedy *et al.* (2010), a troca de equipamentos aumenta a demanda da fabricação dos novos e a consequência é o descarte dos obsoletos que estão sujeitos a um fluxo de fim de vida útil específico e são caracterizados como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), cujas estimativas de descarte globais e atuais mostram que triplicarão até 2025. Estima-se ainda que de 41 a 152 milhões de unidades de computadores tornar-se-ão obsoletos até 2020. De forma semelhante, Yu *et al.* (2010) observaram que a obsolescência nas regiões desenvolvidas deverá duplicar até 2030 e aumentará nas regiões em desenvolvimento.

A necessidade de estudos preventivos sobre a obsolescência programada, a consequente geração de resíduos e a substituição por componentes e materiais alternativos que apresentam menor impacto mostram-se eminentes. Os pesquisadores Dwivedy *et al.* (2010), propõem uma série de fases a serem realizadas para a análise do fluxo de computadores e seus resíduos. Essas fases consistem, basicamente, em suposições sobre a distribuição da vida útil para EEE (Equipamentos Eletro Eletrônicos), calculando as taxas

de inserção dos computadores em residências e no comércio, considerando a população, o número de equipamentos usados, o poder aquisitivo dos consumidores, as previsões de futuras vendas, e ainda, os equipamentos e as tecnologias disponíveis, a quantidade de resíduos gerados no passado e nas futuras gerações e, finalmente, a análise do fluxo de material do fim de vida e a estimativa dos tipos de reciclagem no futuro.

Os estudos das previsões de geração de resíduos eletrônicos dependem diretamente do tempo de vida útil dos computadores, sendo esta a variável mais importante e que exige a compreensão do comportamento do consumidor (LEIGH *et al.*, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2012).

No Brasil, um recente estudo demonstrou a atual situação do tratamento e regulações pertinentes aos REEEs (ARAÚJO *et al.*, 2012). É comum não haver dados com muita clareza sobre a quantidade de resíduos. Para uma análise completa é necessário que haja uma avaliação do fluxo de materiais e também da ACV, para conhecer os impactos ao longo do ciclo de vida, considerando possíveis formas de reutilização, remoldagem, tratamento e/ou eliminação dos materiais.

Numa análise feita por Ryan *et al.*(2010), após o fim de vida útil os monitores de LCD são destinados a aterros, restringindo a recuperação ou reuso de materiais, como o aço, o alumínio, o cobre dentre vários outros. Para essa recuperação, observada como forma de proteção ambiental, seria necessária a mudança de atitude dentro do ciclo de vida dos produtos, assumindo nova postura frente a recuperação desses materiais. Para Veit (2005), a produção secundária de metais recuperados de sucatas ou resíduos mostra-se viável, com nível de purificação melhor e ainda reduz em até 90% o uso de energia.

Para os monitores CRT foi identificado em estudo feito por Singh *et al.*(2016), que esses dispositivos mesmo que fabricados desde a década de 1950 e não sendo comercializados atualmente, ainda não foram descartados como resíduos e com isso tornam-se alvo de grande preocupação ambiental, pela baixa demanda de utilização dos seus componentes principalmente em países em desenvolvimento. A tecnologia CRT para televisores e monitores está obsoleta e o vidro com chumbo é perigoso e se acumula pela adoção de telas planas para monitores (SINGH *et al.*, 2016). O chumbo e o estanho tem grande concentração no funil de vidro do tubo CRT e se não manuseado corretamente pode representar riscos ao ambiente (ANDREOLA *et al.*, 2007).

Os metais primários extraídos para a produção garantem um grande impacto ambiental, principalmente quando o objetivo é extrair os metais preciosos que se

apresentam em baixas concentrações e necessitam de grande volume de movimentação de terras pelas mineradoras. Além disso, águas residuais e dióxido de enxofre (SO₂) são gerados pelo grande uso de energia, aumentando assim as emissões de dióxido de carbono (CO₂) (UNEP, 2009).

Ainda segundo a UNEP (2009), a reciclagem de metais proporciona a redução da emissão de gás carbono (CO₂) e traz vantagens significativas ao uso do solo e na redução das emissões perigosas. A reciclagem, o reuso e a produção limpa de produtos sustentáveis são ações definidas como diretrizes de *Ecodesign*.

Caldeira-Pires *et al.* (2005) relatam que os impactos ambientais não se originam onde é mais fácil de vê-los, ou seja, nas fases de uso e fim de vida, mas sim nas concepções do produto, definições de design, escolha de materiais e processos e nas escolhas das técnicas para fabricação. Dentre as diretrizes de *Ecodesign*, durante o desenvolvimento de um produto, todas essas etapas exigem vigilância constante, com o pensamento de ciclo de vida focado na produção e nas suas formas de reciclagem, objetivando não somente o produto final ecologicamente concebido, mas também sua cadeia produtiva por completo.

Segundo Luz *et al.* (2010), para que haja a promoção do *Ecodesign*, o uso de materiais renováveis ou reciclados, consumidores de menores quantidades de energia nas fases da obtenção do material são diretrizes essenciais e devem ser ponderadas nos estágios iniciais do desenvolvimento de um produto.

O *Ecodesign* é uma ferramenta essencial e inovadora para uma abordagem preventiva e abrangente visando a melhoria do desempenho e responsabilidade ambiental conservando as características funcionais com a apresentação de novas perspectivas ao fabricante, ao consumidor e a sociedade em geral sobre a avaliação do ciclo de vida de um produto e os impactos ambientais refletidos sobre os resultados das análises do inventário de ciclo de vida (ICV), podendo viabilizar o conhecimento das ações mitigatórias aos impactos ambientais antes mesmo do produto ser lançado (EU, 2009; PLATCHECK, 2012; PIGOSSO *et al.*, 2013; ISO 14040, 2006).

Em recente estudo considerado como “mineração urbana”, desenvolvido por Eygen *et al.* (2016) no qual relata sobre a economia de recursos, obteve como resultado o consumo menor de recursos quando comparado ao simples descarte dos dispositivos eletroeletrônicos em aterros. Devido a grande concentração de metais preciosos, metais básicos nesses dispositivos a recuperação desses materiais proporciona a mitigação da

escassez de recursos primários. Para que o material seja recuperado é adotada a reciclagem cujas ações primárias são classificadas como a coleta e classificação, desmatelamento e separação, e finalmente o processamento (EYGEN et al., 2016).

Como forma de captação de equipamentos para o reuso tem-se a iniciativa do governo federal, através do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (MPOG) que viabiliza os Centros de Recondicionamento de Computadores (CRC). Os CRC's têm como função promover cursos de informática, recondicionar, limpar, substituir e / ou acrescentar peças nos computadores para a melhoria do potencial de processamento e desempenho (MPOG, 2009; NOVAES, 2012). Esses Centros de Recondicionamento após caracterização e aproveitamento dos equipamentos viáveis ao reuso, promovem o descarte de resíduos de forma correta em percepção ao cunho ambiental, conforme instrui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Contudo, as fases dentro do ciclo de vida de um produto quando caracterizadas pela utilização de materiais reusados ou reciclados, com a projeção da extensão do tempo de vida útil, a adoção de fontes de energia limpa e o design funcional com menor uso de energia podem desenvolver um produto sustentável e menos agressor ao meio ambiente. Nesse estudo é proposto a caracterização do uso de água e de energia e os potenciais impactos inerentes às fases do ciclo de vida do *desktop* para a proposição de cenários ao fim de vida como forma de sugestão para ações benéficas ao meio ambiente.

2.3 – ESTRUTURA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E SUA APLICAÇÃO A ELETROELETRÔNICOS

2.3.1 – Definição e estrutura da ACV

Os estudos da ACV dos dispositivos eletroeletrônicos ganham a cada dia mais espaço e importância. A investigação do desempenho ambiental dos produtos eletrônicos em todas as fases do ciclo de vida, a aplicação de métodos de avaliação e categorias de impacto e a adoção de *software* auxiliar são usados para gerarem estimativas de impactos sobre o meio ambiente (DUAN *et al.*, 2009).

Em trabalho anterior, a avaliação de ciclo de vida foi aplicada a computadores utilizando diferentes cenários de reciclagem com o objetivo de informar a um público interessado sobre o desenvolvimento de produtos ecológicos, legisladores ambientais e recuperadores de materiais (CHOI *et al.*, 2006).

A Avaliação do Ciclo de Vida é estudada por mais de cinco décadas e é uma técnica de avaliação que aborda os aspectos ambientais e os potenciais impactos associados aos produtos manufaturados e consumidos, identificando oportunidades de melhoria do desempenho ambiental, auxiliando o planejamento estratégico, o planejamento de prioridades e os esquemas de *marketing*. (ISO 14040, 2006; ILCD Handbook, 2010). Curran (2006) considerou como um dos estudos de base de ACV, a iniciativa da Coca-Cola em identificar nas embalagens de refrigerantes aquelas que além de utilizarem uma quantidade menor de recursos para sua produção teriam os menores volumes para as emissões ambientais. Esses processos foram inventariados em 1965, nos Estados Unidos, identificando as matérias primas, os combustíveis e as cargas ambientais durante o processo de fabricação das embalagens. Tal estudo ficou conhecido como REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis*).

Caldeira-Pires *et al.* (2005) dizem que a ACV é um processo de avaliação de impactos ambientais e da saúde humana causados por produtos, serviços ou quaisquer atividades econômicas durante os seus ciclos de vida que promovam mudanças tecnológicas, otimização do uso de materiais e de energia quando empregados os processos de reuso e de reciclagem.

A ACV é estruturada em quatro fases: Objetivo e Escopo, a Análise do Inventário, a Avaliação de Impacto e a Interpretação. Em todas as fases e entre elas é previsto e é de fundamental importância a interação com a fase de interpretação. Cada estudo deve ser considerado como específico pelas características de cada produto avaliado. A Figura 1 mostra a estrutura da ACV (ISO 14040, 2006; ILCD Handbook, 2010; GUINÉE *et al.*, 2011).

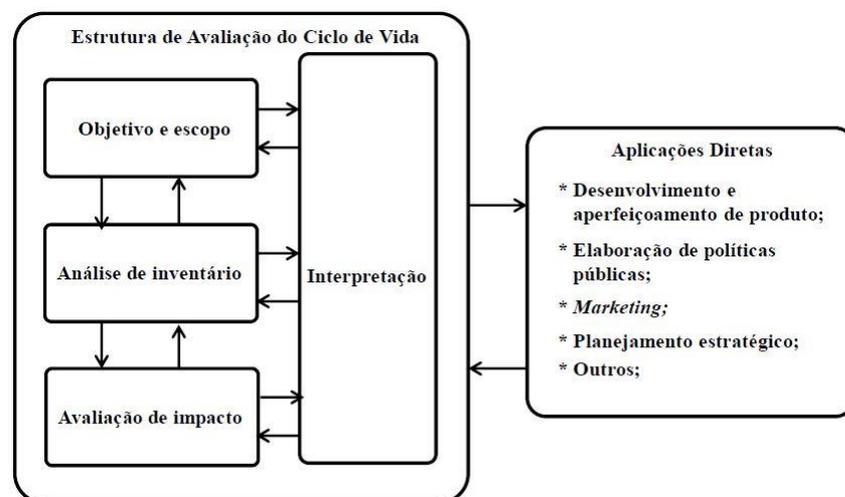


Figura 1 – Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).

As fases e suas características (LEÃO, 2016; GUIMARÃES, 2013; ILCD Handbook, 2010; ISO 14040, 2006):

1. **Objetivo e escopo:** A fase define a aplicação pretendida, as razões do estudo e o público-alvo, ou seja, o objetivo e a metodologia aplicados na avaliação definindo as fronteiras e unidade funcional do sistema.
2. **Análise de inventário:** A fase é caracterizada pela coleta de dados e dos cálculos da quantificação de entradas e saídas.
3. **Avaliação do impacto:** Através da análise de inventário, juntamente com os fatores de caracterização, é definido o perfil da AICV (Análise de Impacto de Ciclo de Vida), em que são avaliados os potenciais impactos causados no ambiente através do sistema em estudo.
4. **Interpretação:** São considerados os dados obtidos em cada fase e interpretados de acordo com a metodologia e objetivos especificados

2.3.2 – Definição de objetivo e escopo da ACV

De acordo com a ISO 14040 e ISO 14044 (2006), a definição e escopo devem ser considerados de forma transparente e abrangendo a totalidade de requisitos para que o estudo seja realizado conforme o objetivo declarado. O trabalho pode ser explicitado como estudo de comparação de materiais ou de descrição de processos. Devem ser definidos como objetivo do estudo: a aplicação pretendida, os motivos, o público-alvo e se os resultados obtidos podem ser comparados e publicados ao público geral. No escopo devem ser apresentadas as características do sistema como a abrangência e os limites, a unidade funcional, a necessidade ou a existência de alocação, a caracterização e os tipos de impactos, as suposições e limitações, a análise crítica, a qualidade dos dados, tipo e formato de relatório do estudo para garantir sua qualidade.

Para Teehan *et al.* (2012), os estudos dos eletrônicos primam pela identificação dos impactos referentes às unidades de composição dos dispositivos eletrônicos para divulgação, porém esse objetivo é contraposto pela ausência de listas completas dos materiais agregados à composição das peças.

Os objetivos, embora sejam aplicados ao fim de vida dos eletrônicos, várias outras questões podem ser verificadas como a tecnologia de fabricação, os procedimentos de desmontagem, as tecnologias de reciclagem e também a área geográfica residual (NOON *et al.*, 2011).

Os limites do sistema e a unidade funcional para os produtos eletrônicos devem abranger os contextos de espaço, tempo e tecnologia, incluindo todo o ciclo de vida, como a produção de matéria-prima, a fabricação de peças e componentes, o transporte, o uso e o descarte, bem como as definições de região ou regiões onde foram ou serão empregados, do tempo de utilidade e do perfil do usuário (BHAKAR *et al.*, 2015; SONG *et al.*, 2013., NOON *et al.*, 2011; CHOI *et al.*, 2006).

2.3.3 – Inventário de ciclo de vida - ICV

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) de um produto compreende a coleta de dados mensuráveis como massa, volume, energia e outros dados de entradas e saídas da unidade funcional (LEÃO, 2016). Segundo ILCD Handbook (2010) e Socolof *et al.* (2005), é a identificação e a quantificação de entradas como insumos, matérias primas, consumos de água e energia, de reagentes químicos e a saída do produtos e emissões no ar, na água e no solo, da unidade funcional adotada.

O desenho de fluxogramas deve descrever os processos e suas relações com as entradas e saídas do sistema de forma qualitativa e quantitativa e é uma forma de diminuir o risco de interpretações errôneas (ISO 14040, 2006). A Figura 2 mostra o fluxograma de um Inventário do Ciclo de Vida.

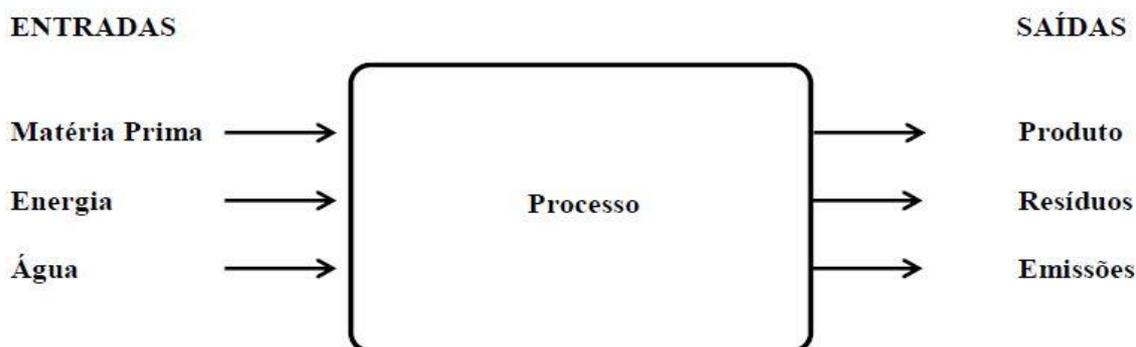


Figura 2 – Fluxograma de um Inventário do Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).

Com a construção de uma cadeia de fluxos, a partir da Figura 2 como modelo, é possível fazer um levantamento de dados de entradas e saídas contendo o consumo de recursos naturais, água e energia e emissões para o solo, ar e água, para todas as etapas incluídas sob as fronteiras do objetivo do estudo de ACV. Esses dados são compilados e as cargas ambientais do sistema são calculadas e relacionadas à unidade funcional (COLTRO, 2007).

Os dados de entrada e saída sofrem influência de interesses. A obtenção de dados dos dispositivos eletrônicos pode se revelar dificultosa pela ausência da disponibilidade da divulgação dessas informações pelas empresas do ramo, sendo necessárias algumas adaptações, como por exemplo, o uso da desmontagem para caracterização das peças como uma lógica de reversão (SONG *et al.*, 2013).

2.3.4 – Avaliação de impacto de ciclo de vida – AICV

A avaliação das cargas ambientais é um processo qualitativo e quantitativo, como opção pode ser usada a avaliação de magnitude que está relacionada às entradas e saídas provenientes do inventário (ARAÚJO, 2013; LEÃO, 2016). Conforme a ISO 14044 (2006) a AICV deve conter a seleção das categorias, a classificação e a caracterização relativas aos potenciais impactos.

A AICV propõe uma visão ambiental e de recursos de todo o sistema com a atribuição dos resultados obtidos para várias categorias de impacto com seus respectivos indicadores, que depois de avaliados fornecem informações sobre a relação dos impactos provenientes das entradas e saídas do produto (ISO 14040, 2006). Os dados do inventário são caracterizados em equivalência com a multiplicação por fatores em termos de impactos ambientais, como por exemplo, 1 kg de metano é equivalente a 23 kg de CO₂ (COLTRO, 2007).

Os impactos obtidos após a inserção do inventário podem ser avaliados utilizando os métodos *midpoint* e *endpoint*. O método *midpoint* (ponto médio), refere-se aos potenciais impactos ambientais que podem ser gerados devido às emissões relacionadas no inventário do ciclo de vida. Um exemplo é o CML 2001 (*Centrum voor Milieukunde Leiden*) que analisa a sensibilidade dos resultados globais obtidos. O método *endpoint* (ponto de extremidade) faz a ligação do uso dos recursos e das emissões aos danos à saúde humana, consumo de recursos e a qualidade do ecossistema, é multi passo e leva a um único número como resultado, método *Eco-Indicator 99* (ISO 14044, 2006; ILCD Handbook, 2010; DUAN *et al.*, 2009; SONG *et al.*, 2013;).

O método *midpoint* CML 2001, desenvolvido na Holanda pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, possui dez categorias de impacto para a avaliação da cadeia produtiva, sendo elas: Depleção abiótica, Depleção da camada de ozônio, Ecotoxicidade em água doce, Ecotoxicidade em águas marinhas, Ecotoxicidade terrestre, Eutrofização, Potencial de acidificação, Potencial de aquecimento global, Oxidação

fotoquímica e Toxicidade humana (GUINEÉ *et al.*, 2002; ARAUJO, 2013). A Figura 3 mostra a estrutura da categorização de impactos.

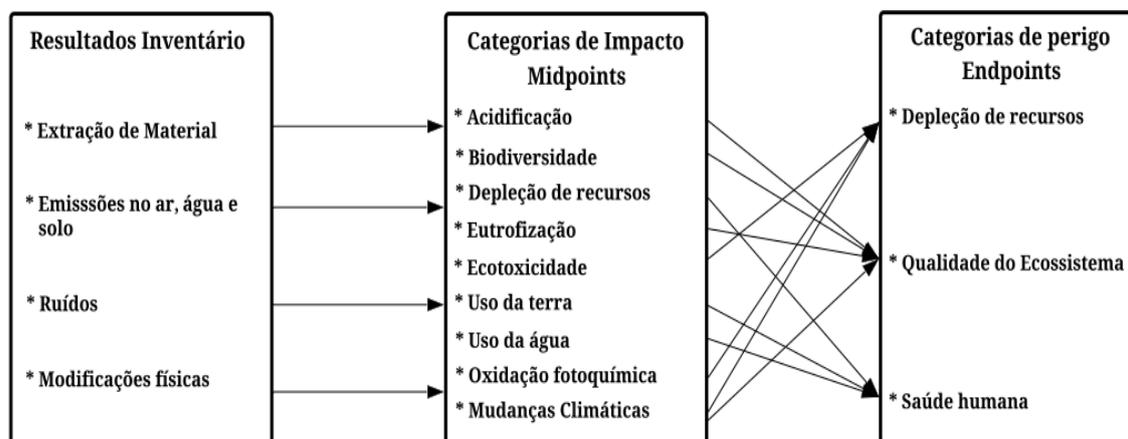


Figura 3 – Estrutura das categorias de impacto (LEÃO, 2016).

Na Figura 3 podemos observar a ligação entre os dois métodos para a categorização dos potenciais impactos ambientais *endpoints* e *midpoints*. Nas Análises de Ciclo de Vida, usualmente, podemos avaliar algumas subcategorias de impactos como a eutrofização, ecotoxicidade, mudanças climáticas, acidificação, depleção da camada de ozônio, uso da terra dentre outros (KLÖEPFFER, 2008; ARAÚJO, 2013).

Para a avaliação dos potenciais impactos foram observados os maiores índices e representatividade obtida na literatura de eletroeletrônicos. Quanto aos impactos e consumos, Socolof *et al.* (2001) fizeram considerações em todas as fases do ciclo de vida para os impactos de eutrofização, depleção abiótica fóssil, aquecimento global, uso de energia, uso de água e efeitos crônicos a saúde (SO₄) caracterizado como potencial de acidificação.

As categorias de impacto estudadas pelos pesquisadores Song *et al.* (2013) foram pertinentes a saúde humana e ao ecossistema, as quais foram identificadas, como maiores contribuintes para impactos durante o ciclo de vida, potenciais de eutrofização, depleção abiótica fóssil, acidificação, aquecimento global, toxicidade humana e toxicidade marinha.

Já para os estudiosos Bhakar *et al.* (2015), os monitores de CRT, LCD e LED tem incidências em 4 categorias de impacto, sendo elas as mudanças climáticas, recursos, saúde humana e qualidade do ecossistema, nas quais foram relevantes os índices de aquecimento global, eutrofização e depleção abiótica.

Nesse trabalho, as categorias de impacto adotadas para efeito de comparação com a literatura, adotando o método CML, serão de potencial aquecimento global (PAG - kg CO₂ eq.), de eutrofização (PE – PO₄ eq.), de depleção abiótica fóssil (DAF – kg Sb eq.) e potencial de acidificação (PA – kg SO₂ eq.).

Segundo Chenani *et al.* (2015), essas categorias possuem resumidamente as seguintes características:

- Depleção abiótica: Os impactos caracterizados nessa categoria são advindos dos combustíveis fósseis e da extração de minerais. Sua referência de unidade é quilograma de antimônio equivalente (kg Sb eq.) por quilograma de mineral extraído ou a unidade de Megajoule (MJ) por unidade funcional.
- Eutrofização: É a liberação macronutrientes como o nitrogênio e o fósforo em altos níveis no meio ambiente. Sua unidade é quilograma de fosfato equivalente por quilograma de emissão ou kg PO₄ eq.
- Potencial de acidificação: É a liberação de poluentes acidificantes, como o dióxido de enxofre (SO₂) e/ou óxidos de nitrogênio (NO_x) no ar. As águas subterrâneas e superficiais, bem como, organismos biológicos, ecossistemas e materiais são impactados negativamente pelas emissões dessas substâncias. A unidade de referência é quilograma de dióxido de enxofre equivalente para cada produto químico acidificante ou kg SO₂-eq.
- Potencial de aquecimento global: É a demonstração do impacto de cada produto no aquecimento global pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) para o ar em 100 anos. Sua unidade é referida como quilogramas de dióxido de carbono por quilograma de emissão ou kg CO₂ eq.

2.3.5 – O uso da água e da energia para a produção de eletroeletrônicos

A água é um recurso natural e sua importância torna-se questão central para debate sobre sustentabilidade, sua demanda crescente, sua qualidade e aumento da escassez levam a uma melhor gestão e compreensão dos impactos relacionados à mesma (ISO 14046, 2014).

Segundo Khoeler (2008), o uso da água (pegada hídrica), de forma direta e indireta, é necessário para todas as atividades dentro do ciclo de vida de um produto. As entradas de água são providas pela natureza tanto por evaporação através das plantas e vegetações diversas quanto por meio de armazenamentos nas superfícies ou no

subterrâneo. Já nas saídas a água estará disponível para tratamento, reuso, e quando evaporada poderá ser utilizada em outras atividades, pois voltará à natureza (KHOELER, 2008).

Para a produção desses circuitos, apesar de alguns possuírem baixa massa (2g), são necessários uma média de 1,6 kg de combustível fóssil, 72 g de insumos químicos, 32 kg de água e 700 g de gases elementares (WILLIAMS *et al.*, 2002; NOVAES, 2012; ARAÚJO, 2013).

Para Socolof *et al.* (2001), o uso da água nos dispositivos eletrônicos é bastante elevado na extração de materiais primários e auxiliares. Em seu trabalho, o uso de água para a produção de monitores CRT e LCD durante todo o ciclo de vida variou entre 3.000 kg e 16.000 kg. Já o uso de energia variou entre 3.000 MJ até 21.000 MJ (SOCOLOF *et al.*, 2001).

Nos estudos de balanço energético é considerada toda a energia produzida e utilizada nos processos desde a extração de matéria prima até a disposição dos resíduos e sua fonte de oferta é variável pela localidade pertencente aos processos (DONKE, 2016).

A oferta do mix energético brasileiro conta com a hidroeleticidade como principal fonte, seguidos das fontes de gás natural, biomassa e eólica. A Figura 4 apresenta a Matriz Energética Brasileira que foi utilizada para a fase de uso nos equipamentos eletroeletrônicos, nesse estudo.

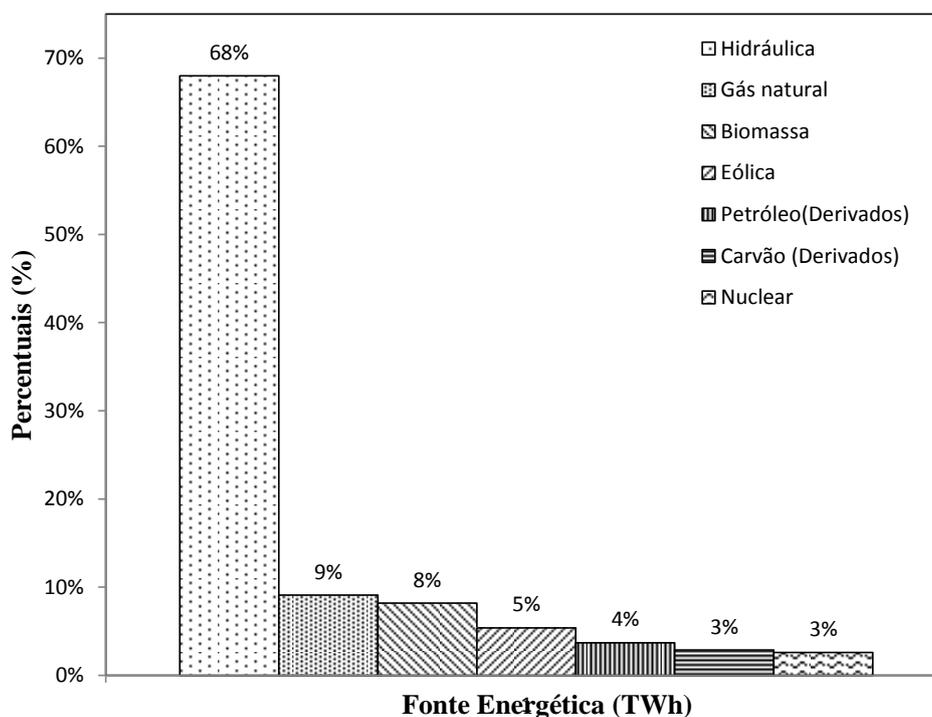


Figura 4 – Matriz Energética Brasileira de 2016 (BEN, 2017).

Na Figura 4 podemos observar nitidamente que a energia obtida pela forma hidráulica é muito superior às demais gerações. Os resultados dos impactos dessa geração energética são menores quando comparados à geração por fontes de origem fóssil ou extração mineral (TEEHAN *et al.*, 2012).

No presente estudo, as fontes energéticas para a produção dos componentes dos computadores foram assumidas como sendo Chinesa com o processo do mix energético da base de dados GaBi para uso na compilação de dados. Conforme o estudo dos pesquisadores Teehan *et al.* (2012), a produção energética chinesa para uso no ciclo de vida dos computadores é baseada no carvão e, por isso, o impacto de aquecimento global é maior em aproximadamente 30 vezes o valor dessa categoria quando comparados aos valores obtidos na Noruega que, semelhante ao Brasil, é dependente da geração hidrelétrica. Para Babbitt *et al.* (2009), a produção energética intensa, necessária para a produção e o uso dos produtos eletrônicos é responsável por grande parte de sua carga de impacto ambiental. A Figura 5 mostra a matriz energética da China.

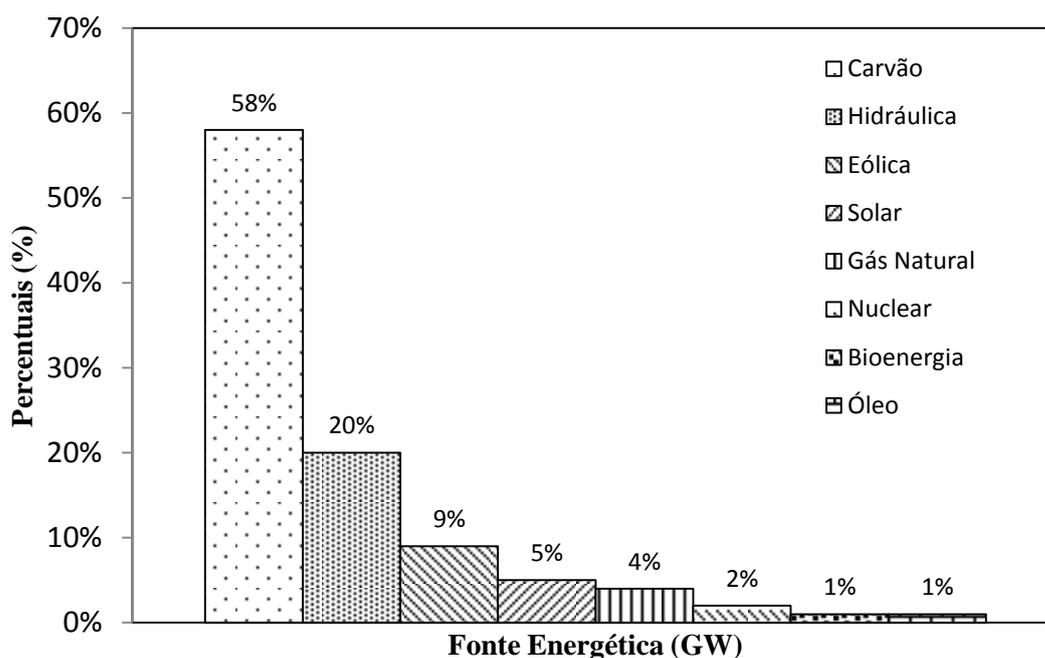


Figura 5 – Matriz Energética Chinesa de 2017 (IEA, 2017).

A melhoria da eficiência energética é uma das diretrizes de *Ecodesign*. O uso final mais eficiente da eletricidade contribui para a redução dos gases de efeito estufa (EU, 2009). Para Socolof *et al.* (2005), o uso da água e da energia devem ser comparados e

avaliados em uma ACV como forma de detalhar o ciclo desse produto e proporcionar a mitigação de impacto ambientais.

2.3.6 – Interpretação

A interpretação é a fase final do ciclo de vida de um produto. Nela os resultados da análise do inventário e da avaliação de impacto são resumidos e discutidos em conformidade com a definição do escopo e do objetivo do estudo (ISO 14040, 2006; COLTRO, 2007).

A interpretação é essencial e é utilizada com a interação às outras fases durante o estudo do ciclo de vida, garantindo a sensibilidade, completeza, consistência e a confiança aos dados adquiridos. São interpretados os dados do sistema total para a divulgação das recomendações ao público-alvo, bem como as conclusões, limitações, recomendações com objetivo de obter melhorias para a redução de impactos significativos apurados no estudo (ISO 14043, 2000; ISO 14040, 2006; LEÃO; MENDES *et al.*, 2016).

Aos eletroeletrônicos, a interpretação é o confronto de resultados obtidos pelas análises das definições do escopo, das limitações que podem levar a revisões ou até mesmo alterações das fases de uma ACV (ARAÚJO, 2013; HIKWAMA, 2005).

2.3.7 – Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade aplicada a eletroeletrônicos pode ser usada para verificação da robustez dos resultados auferidos em uma Avaliação de Ciclo de Vida. É realizada alterando alguma variável de entrada para medição do comportamento em diferentes situações nas demais variáveis, e tem como utilidade a obtenção das variações de duas ou mais variáveis em relação aos impactos (BHAKAR *et al.*, 2015).

A sensibilidade pode ser obtida pela substituição do método de avaliação ou mesmo com a complementação de dois métodos. Em estudo de Song *et al.* (2013), foi utilizado a metodologia CML 2001 e complementada pela metodologia Eco-Indicator 99.

Para Araújo (2013), as análises de sensibilidade nas modelagens de cenários de equipamentos eletrônicos garantem a transparência e podem decrescer as incertezas de uma ACV.

Em recente estudo, Bhakar *et al.* (2015), analisou a robustez do modelo propondo as alterações do mix elétrico da Índia pelo mix elétrico da Alemanha, resultando em mudanças significativas.

3 – METODOLOGIA

3.1 – DEFINIÇÕES DO OBJETIVO E ESCOPO

O estudo foi realizado de acordo com as perspectivas da ISO 14040 e 14044, normas reguladoras internacionais que abrangem os princípios, a estrutura, as orientações e os requisitos da Avaliação do Ciclo de Vida – ACV com o objetivo de avaliar os potenciais impactos ambientais de computadores de mesa – *desktops*, que utilizam monitores CRT e LCD, desde a sua concepção até o final de sua vida útil, sugerindo intervenções pós-uso, como a reciclagem e o reuso da máquina.

Para atingir o objetivo da avaliação foi necessário o levantamento de dados secundários em literatura sobre o consumo de materiais, o uso de insumos e das emissões ao meio ambiente. Quando não havia dados suficientes, a base de dados *Ecoinvent* da versão 3.4. foi utilizada. A modelagem dos processos foi facilitada pelo *software* GaBi 7.3 Education© e sua base de dados da versão 6.115.

3.1.1 – Unidade funcional

A unidade funcional adotada foi de um (1) computador de mesa constituído por monitor e gabinete contemplando, no caso do monitor, os dois tipos: CRT e LCD, sendo assumido o tempo de vida útil por um período de 4 anos (SONG *et al.*, 2013). Todos os resultados encontrados nas categorias de impacto são descritos com a alternância entre os modelos dos monitores, sendo os mesmos vinculados ao gabinete.

3.1.2 – Definição das fronteiras do sistema

Os limites do sistema foram definidos com a observação dos processos unitários incluídos nele e o inventário detalhado das entradas e saídas dos eletroeletrônicos. O estudo foi caracterizado como um ciclo de vida completo, do berço ao túmulo, levando em consideração a extração de matéria-prima e seu processamento até o descarte do equipamento, após o final do tempo de vida útil. Para a avaliação do ciclo de vida foram consideradas como itens essenciais os impactos ambientais de aquecimento global, de eutrofização, de acidificação e o de depleção abiótica e algumas diretrizes de *Ecodesign* voltadas ao uso de água e de energia, e também ações de reuso e de reciclagem após fim de vida do computador. As ações de reuso e reciclagem foram item de modelagem para diferentes cenários de fim de vida.

As fases consideradas para a modelagem do ciclo de vida dos computadores de mesa foram divididas em: produção, distribuição, uso e fim de vida. A Figura 6 apresenta as fronteiras do sistema relacionado às fases existentes em todo o ciclo de vida proposto no estudo.

Para o Cenário de Referência foram comparados o computador constituído por gabinete e monitor CRT de 17’’ e o computador com gabinete e monitor LCD de 17’’, como forma de determinar a real situação da carga ambiental de ambos, principalmente da tecnologia obsoleta do CRT que a muito tempo é substituída pela tecnologia de telas planas como a do monitor de LCD. Foi adotado o gabinete para formação completa da unidade funcional, responsável pelo processamento de informações, outrora é disposta em aterros ou lixões, onde o controle mesmo que regulamentado por legislação específica ainda não foram amplamente instalados. Este cenário é tido como referência de base a todo o estudo e comparado aos demais cenários para o fim de vida.

No Cenário de Reciclagem as comparações entre os computadores continuam sendo exibidas, o transporte rodoviário e o aéreo tornaram-se facultativos. Para a reciclagem assumida no Brasil não foi considerado o transporte rodoviário para a produção dos computadores, já o restante do material continuou sendo transportado da China.

Para o cenário com reuso computador é reusado de forma completa, sendo acrescentada uma placa de circuito integrado do tipo memória como forma de atualização de processamento sendo que o transporte adotado foi o rodoviário para atendimento ao traslado e ao atendimento a outro público.

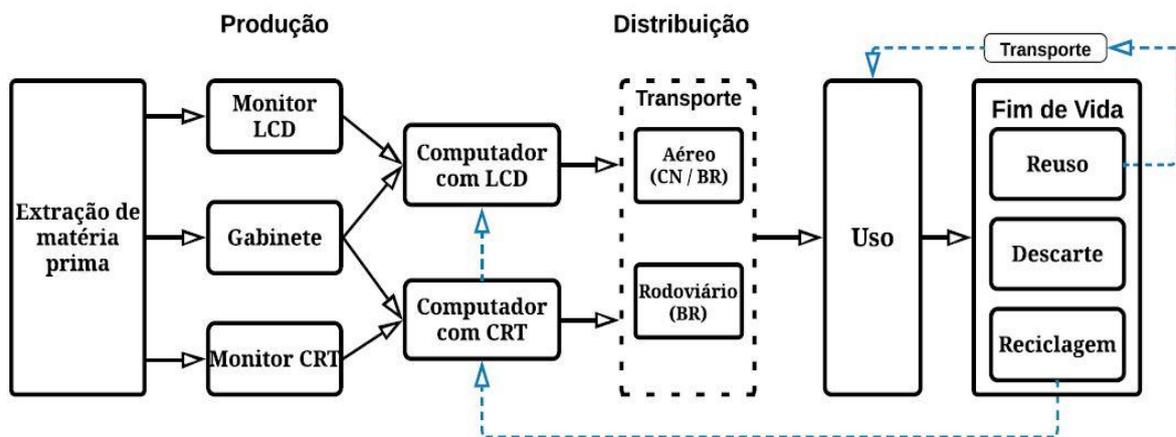


Figura 6 – Fronteiras do sistema de computadores de mesa.

3.1.3 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (AICV)

O Inventário de Ciclo de Vida (ICV) identifica e quantifica os materiais e recursos de entradas e saídas que compõem o ciclo de vida de um sistema de um produto.

Nesse estudo, o sistema é composto por um computador formado por um gabinete e um monitor, sendo que o gabinete tem o peso total de 9,47 kg, seguidos pelo monitor CRT de 17” com peso de 14,83 kg e do monitor LCD de 17” com o peso de 6,0 kg, adotados conforme estudo de Song *et al.* (2013), alternando os monitores conforme cenários a serem descritos posteriormente. Estão fora do escopo deste trabalho, além das embalagens, o teclado e o *mouse*, em consonância ao estudo dos pesquisadores Choi *et al.* (2006).

O ICV foi baseado em análises do sistema e seus limites, frente à cadeia dos processos e componentes de cada produto ao longo de todo o ciclo de vida. Com essas definições cada processo é considerado como unitário, cujos dados partiram de coleta secundária e não foram identificadas etapas de alocação. Além da coleta secundária de dados do inventário em literatura, foram utilizadas informações da base de dados de inventários de ciclo de vida da Ecoinvent em sua versão 3.4 (2017) e base de dados GaBi 7.3 Education©, como forma de assegurar a completude e transparência nos processos construídos e avaliados.

A Tabela 3 mostra o inventário com os produtos e peças maiores (disco, fonte e outros). O Apêndice (A) mostra detalhadamente o inventário completo do gabinete desktop.

O *desktop* ou gabinete é composto internamente pela unidade de disco, a unidade ótica CD/DVD-ROM, a fonte de alimentação energética, as placas de circuitos integrados, como os módulos de memória, placas de controle lógico, a placa mãe, a caixa metálica, a caixa plástica e os dispositivos auxiliares de funcionamento como o cabo, o dissipador de calor e o ventilador.

Tabela 3 – Dados do inventário da produção do Gabinete, adaptado de SONG *et al.*, 2013.

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$8,06 \times 10^2$
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	kg	$1,61 \times 10^{-1}$
Aço	kg	$1,05 \times 10^1$
Água	kg	$1,36 \times 10^3$
Alumínio fundido	kg	$6,62 \times 10^{-1}$
Circuito integrado - tipo memória	kg	$2,69 \times 10^{-2}$
Cobre	kg	$1,05 \times 10^{-1}$
Disco rígido	kg	$5,50 \times 10^{-1}$
Fonte de alimentação	kg	$1,62 \times 10^0$
Placa de circuito impresso - PCI	kg	$3,63 \times 10^{-1}$
Placa mãe	kg	$2,70 \times 10^{-1}$
Polietileno granulado	kg	$2,10 \times 10^{-2}$
Polipropileno granulado	kg	$2,05 \times 10^{-1}$
Tomada Entrada e Saída	kg	$4,90 \times 10^{-2}$
Unidade CD-ROM / DVD-ROM	kg	$7,50 \times 10^{-1}$
Saídas		
Gabinete desktop	kg	$9,47 \times 10^0$
Água	kg	$1,36 \times 10^3$
Água de resfriamento	kg	$8,28 \times 10^1$
Resíduos de polipropileno	kg	$1,3 \times 10^{-1}$
Resíduos diversos	kg	$5,76 \times 10^0$

A Tabela 4 apresenta o inventário da produção do monitor CRT 17’’ e o inventário completo considerando os produtos, as unidades e as quantidades são apresentadas no Apêndice (B).

No monitor CRT foram inseridos o tubo de raio catódico, as placas de circuitos integrados, a caixa plástica, os cabos e alguns metais para partes metálicas dentre outros materiais.

Tabela 4 – Dados do inventário da produção do Monitor CRT 17”, adaptado de SONG *et al.*, 2013.

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$8,68 \times 10^2$
Aço	kg	$3,45 \times 10^0$
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	kg	$3,75 \times 10^{-1}$
Água	kg	$2,27 \times 10^3$
Alumínio fundido	kg	$6,67 \times 10^{-1}$
Cicloexano	kg	$1,88 \times 10^{-4}$
Cobre	kg	$1,03 \times 10^{-1}$
Isopropanol	kg	$1,94 \times 10^{-2}$
Placa de circuito impresso - PCI	kg	$9,74 \times 10^{-1}$
Poliuretano flexível (PU)	kg	$1,26 \times 10^{-2}$
Polivinilcloro	kg	$2,97 \times 10^0$
Tomada Entrada e Saída	kg	$5,85 \times 10^{-2}$
Tubo de raio catódico	kg	$9,48 \times 10^0$
Saídas		
Monitor “CRT 17”	kg	$1,48 \times 10^1$
Água	kg	$2,27 \times 10^3$
Resíduos de plástico	kg	$7,16 \times 10^{-2}$
Resíduos de vidro - quebra	kg	$3,38 \times 10^{-1}$
Resíduos não especificados	kg	$1,11 \times 10^0$

Para a construção do inventário do monitor LCD foram considerados os seguintes componentes: a caixa plástica, os metais para partes metálicas, as placas de circuitos integrados, os cabos, o vidro do painel LCD, entre outros. Os materiais como a água e a energia, e os componentes maiores como vidro, retroiluminação e polarizadores estão presentes e foram referenciados na Tabela 5, que mostra o inventário da produção do monitor LCD 17” como auxiliares e energia de montagem de cristal líquido e os auxiliares de energia de montagem do monitor. O inventário detalhado de todos os componentes do monitor LCD está apresentado no Apêndice (C).

Tabela 5 – Dados do Inventário da produção do Monitor LCD 17", adaptado de SONG *et al.*, 2013.

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Aço	kg	$9,09 \times 10^{-1}$
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	kg	$2,47 \times 10^{-1}$
Alumínio	kg	$8,89 \times 10^{-1}$
Auxiliares e energia - Montagem cristal líquido	kg	$5,10 \times 10^0$
Auxiliares e energia - Montagem monitor	kg	$4,01 \times 10^0$
Borracha sintética	kg	$1,50 \times 10^{-2}$
Placa de circuito impresso	kg	$2,23 \times 10^{-1}$
Poliestireno granulado	kg	$6,75 \times 10^{-1}$
Saídas		
Monitor LCD 17"	kg	$6,00 \times 10^0$
Resíduos diversos	kg	$5,16 \times 10^0$

Em todos os equipamentos desse estudo, estão presentes partes adicionais e auxiliares como os resistores, os transistores e os diodos, anexos às placas de circuito integrado dos dispositivos menores como a unidade de CD/DVD, o disco rígido e também nas próprias placas de circuito impresso, garantindo o funcionamento do computador. Os componentes menores que constam como integrantes dessas peças não são especificamente mostrados nas Tabelas 3, 4 e 5, porém, os impactos obtidos como resultados do inventário consideraram todo o conjunto. Os processos e devidos materiais para a construção de todos os inventários foram selecionados com auxílio da base de dados do *software* GaBi e da base de dados Ecoinvent 3.4 que estão em detalhes nos apêndices (A), (B) e (C), como descrito anteriormente, no qual o apêndice (A) detêm as peças menores comuns em ambos os equipamentos, como a placa de circuito integrado.

As tabelas de inventário para cada equipamento em específico, contendo informações de entradas e saídas, foram contruídas em função da unidade funcional - um computador de mesa constituído por um gabinete e um dos monitores (LCD ou CRT). O gabinete é o componente principal e o monitor o componente acessório, passível de troca nesta composição.

3.1.4 – Modelagem com o *software* GaBi

A modelagem no *software* GaBi é definida como a compilação e a avaliação das entradas de materiais e saídas de produtos, emissões e rejeitos para atribuição de valores aos potenciais impactos ambientais durante toda a vida útil de um sistema de produto.

Assim que as peças que compõem o computador de mesa e os monitores foram identificados na literatura, os inventários de cada dispositivo foram contruídos e os dados estão nos Apêndices (A) com o Gabinete, no Apêndice (B) com monitor CRT e no Apêndice (C) com o monitor LCD. Posteriormente foram lançados no *software* GaBi 7.3 *Education*©, que possibilitou a construção dos planos, processos e fluxos, elucidando as peças contidas no computador.

Para as caracterizações dos cenários foram utilizadas a unidade de quilograma (kg) para padronizar as unidades de todos os produtos em termos mássicos e a unidade Megajoule (MJ) para energia.

3.2 – CARACTERIZAÇÕES DAS FASES E CENÁRIOS

A seguir será descrita cada uma das fases do ciclo de vida (berço ao túmulo) aplicado a um computador, avaliando diferentes cenários de fim de vida. Os cenários do estudo foram caracterizados como Cenário de Referência com o descarte do computador, Cenário (1) com o reuso do equipamento e Cenário (2) para a reciclagem, ambos alternando entre o computador com monitor CRT e computador com monitor LCD. Ao final foram modelados o Cenário de Sensibilidade. As Figuras 11 e 12 demonstram o fluxograma do Cenário de Referência para as opções de monitores CRT e LCD.

3.2.1 – A Fase de produção

Na fase de produção foram consideradas a extração das matérias primas e a produção das máquinas em outra região do mundo. Os dados disponíveis para essa fase são oriundos da China, portanto o processo utilizado para caracterização energética foi o mix de energia chinesa, para os demais processos foram utilizados a disponibilidade da base de dados do GaBi 7.3 *Education*© e aqueles não existentes foram criados quando identificados na literatura e na base de dados Ecoinvent. Os processos foram detalhados nos inventários do Apêndice (A) com o Gabinete, no Apêndice (B) com monitor CRT e no Apêndice (C) com o monitor LCD.

3.2.2 – A Fase de distribuição

A fase de distribuição teve como meio de transporte a modalidade aérea com saída de Hong Kong / CN e chegada à São Paulo/SP/Brasil, percorrendo uma distância total de 18000 quilômetros lineares por avião de carga movido a querosene. O trajeto linear rodoviário compreende os Centros de Distribuição Logísticos de São Paulo a várias capitais, sendo a distância mediana de 2000 quilômetros percorridos por caminhão reboque movido a diesel.

Para a média de 2000 quilômetros foi considerado como ponto de partida os Centros de Distribuição de Carga (CDC) em São Paulo/SP a cinco (5) capitais nos extremos do país e ao Distrito Federal, como pontos de chegada sendo as capitais: Belém/PA (2500 km), Manaus/AM (2700 km), Porto Velho/RO (2500 km), Campo Grande/MS (1000 km), Porto Alegre/RS (1000 km) e Brasília/DF (1000 km). Foram consideradas as distâncias lineares médias do CDCs às capitais e ao Distrito Federal.

Os cálculos foram promovidos pelos processos disponíveis nos quais o consumo de combustível é considerado pelo peso total e a distância percorrida, sendo a modalidade de frete assumida como trajeto único e dispensada a análise da volta do transporte ao ponto de origem.

3.2.3 – A Fase de uso

Na fase de uso, o tempo de vida útil do equipamento foi fixado em quatro (4) anos ou 1460 dias. O consumo energético nessa fase foi o processo do mix brasileiro, por se tratar da realidade local atual. Para os três tipos de dispositivos eletrônicos foram utilizados uma média do tempo em atividades de 4,2 horas/dia e do tempo em *stand-by* (espera) 2,6 horas/dia (SONG *et al.*, 2013). O consumo energético do *desktop* em atividade é de 0,15 kWh e em *stand-by* 0,02 kWh, o monitor CRT utiliza 0,08 kWh em atividade e 0,005 kWh no modo *stand-by*, já o monitor LCD utiliza 0,035 kWh ativo e 0,002 kWh em *stand-by* conforme dados do estudo de Song *et al.* (2013).

Para o cálculo do consumo elétrico dos equipamentos foram considerados os dados acima e utilizados as equações (1) e (2). A equação (1) descreve o consumo resultante de cada unidade ou dispositivo (Gabinete, Monitor CRT e Monitor LCD) individualmente.

$$\text{Consumo}_{\text{Unidade}}(\text{kWh}) = \text{Consumo}_{\text{hora}}(\text{kWh}) \cdot \text{Tempo}_{\text{Consumodia}} \cdot \text{Total}_{\text{Dias}} \quad (1)$$

O consumo de cada unidade ($\text{Consumo}_{\text{unidade}}$) é o resultado do produto dado pelo consumo de eletricidade por hora de funcionamento ($\text{Consumo}_{\text{hora}}$), o Tempo de consumo durante o dia ($\text{Tempo}_{\text{consumodia}}$) e o total de dias em atividades ($\text{Total}_{\text{dias}}$). A unidade padrão da equação foi adotada como Quilowatt-hora (kWh) e posteriormente equalizada ao Megajoule com multiplicação pelo fator 3,6.

Calculado o consumo para as três unidades (gabinete e monitores), nos estados de atividade e espera (Ativo e *Stand-by*), logo em seguida foram aglutinados os dois valores por dispositivo e posteriormente utilizados na equação (2):

$$\text{Consumo}_{\text{Computador}}(\text{kWh}) = \text{Consumo}_{\text{Gabinete}}(\text{kWh}) + \text{Consumo}_{\text{Monitor}}(\text{kWh}) \quad (2)$$

O consumo elétrico do computador completo ($\text{Consumo}_{\text{computador}}$) é o resultado da adição dos consumos das unidades: gabinete ($\text{Consumo}_{\text{gabinete}}$) e do monitor ($\text{Consumo}_{\text{monitor}}$), sendo alternados os dois tipos (CRT e LCD).

O computador com monitor CRT consumiram ao final do tempo de vida um total de 1.505,26 kWh ou 5.418,94 (MJ), e o computador com o monitor LCD consumiram 1160,99 kWh ou 4.179,57 MJ.

Para a construção dos inventários e modelagem dos cenários o uso de energia tem como referência a unidade de Megajoule (MJ). Existe uma diferença entre a quantidade de eletricidade consumida pela atividade do dispositivo e a quantidade energética para gerar a eletricidade. Contudo é definido como eletricidade o consumo pelas atividades funcionais das partes e de energia o fator necessário para gerar a oferta energética. Nesse contexto utilizou-se o grid energético da China para a produção dos equipamentos e o grid energético brasileiro para as fases de uso, reuso e reciclagem.

3.2.4 – A Fase de fim de vida

O Cenário de Referência se refere ao fim de vida do equipamento como descarte ou a disposição da unidade funcional sem o devido tratamento. Foram consideradas outras duas (2) modalidades alternativas para a disposição dos equipamentos como o reuso e reciclagem. Essas serão propostas obedecendo as diretrizes de *Ecodesign* como ações mitigadoras de impactos.

3.2.4.1 – O Descarte

O descarte foi caracterizado como a disposição do computador completo em lixo comum ao final do período de vida útil fixado em 4 anos. O computador pode ficar exposto e entrar em contato direto com o meio ambiente e devido aos seus componentes como placa eletrônica e bateria podem disseminar compostos nocivos à saúde humana, fauna e flora. A Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) regula os princípios, instrumentos e metas dentre outros mecanismos para gerenciamento dos resíduos. Porém, os aterros sanitários até o presente momento não estão totalmente instalados proporcionando o descarte de forma irregular e com alto índice de periculosidade.

3.2.4.2 – O Reuso

Nesta alternativa de fim de vida, após o tempo de vida útil de quatro (4) anos, o computador será reutilizado por completo. Com isso não sendo necessária a desmontagem e separação. No entanto, foi adicionado mais um (1) módulo de memória como forma de atualização do potencial de processamento de dados.

No transporte foi usado o processo de carga rodoviário de médio porte, com limitação de até 3,3 toneladas de carga útil movido a diesel como combustível, percorrendo como ponto de partida Brasília-DF e como ponto chegada outras localidades dentro do Estado de Goiás, com uma média de 500 km de distância linear. O tempo de vida estendido foi fixado em mais dois (2) anos. Essa modalidade é utilizada para incentivo e disseminação da informática como ferramenta educacional (BRITO, 2008).

3.2.4.3 – A Reciclagem

Na reciclagem, o retorno dos materiais à própria cadeia de produção substitui a necessidade da demanda de novas extrações de matéria prima, sendo uma forma de mitigação de impactos. O cenário foi assumido que os equipamentos, após a fase de uso, foram reciclados no Brasil. Substituindo assim somente parte da matéria-prima extraída na China e transportada via aérea para o Brasil, da mesma forma como proposto no Cenário de Referência. Devido a indisponibilidade de informações sobre os processos de reciclagem, como consumo energético das máquinas recicladoras e de reaproveitamento de materiais na base de dados *GaBi Education*, adotou-se os dados de reciclabilidade em massa, segundo o trabalho de Jönbrink *et al.* (2007), apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa e percentual de material reciclável em Desktops, Monitores LCD e CRT, adaptado de JÖNBRINK *et al.*, 2007.

Massa (kg)	Plástico	Ferro	Não Ferrosos	Eletrônicos	Diversos	Total	Geral (%)
Desktop (kg)							
Bruto	1,13x10 ⁰	6,91x10 ⁰	9,80x10 ⁻¹	1,43x10 ⁰	2,31x10 ⁰	1,28x10 ¹	82%
Reciclável	1,13x10 ⁻¹	6,57x10 ⁰	9,40x10 ⁻¹	6,70x10 ⁻¹	2,19x10 ⁰	1,05x10 ¹	
Parcial (%)	10%	95%	96%	47%	95%	82%	
Monitor LCD							
Bruto	2,25x10 ⁰	3,02x10 ⁰	2,30x10 ⁻¹	2,70x10 ⁻¹	1,05x10 ⁰	6,82x10 ⁰	64%
Reciclável	2,25x10 ⁻¹	2,87x10 ⁰	2,20x10 ⁻¹	8,00x10 ⁻²	1,00x10 ⁰	4,40x10 ⁰	
Parcial (%)	10%	95%	96%	30%	95%	64%	
Monitor CRT							
Bruto	2,41x10 ⁰	1,30x10 ⁻¹	2,40x10 ⁻¹	3,40x10 ⁻¹	1,33x10 ¹	1,64x10 ¹	81%
Reciclável	2,40x10 ⁻¹	1,20x10 ⁻¹	2,20x10 ⁻¹	1,20x10 ⁻¹	1,26x10 ¹	1,33x10 ¹	
Parcial (%)	10%	92%	92%	35%	95%	81%	

Para o uso de energia para o processo de reciclagem foram assumidos os índices de economia definidos em estudo realizado por Williams, 2003, no qual encontrou os valores que perfazem o valor médio de economia energética dos materiais reciclados em 85 MJ/kg para o gabinete e de 52 MJ/kg de monitores, que foi utilizado para definir o consumo energético da reciclagem da unidade funcional desse estudo.

Na fase de produção resultou em um gasto energético aproximado de 2.200 MJ para o computador com monitor CRT e de 2.800 MJ para o computador com monitor LCD.

Como na unidade funcional com CRT temos o peso reciclado médio de 16,4 kg após a retirada do valor energético economizado com a reciclagem (1.100MJ) ainda foi necessário para uma nova produção o total de outros 1.100 MJ de uso energético. Para a unidade funcional com LCD a economia atingiu 900 MJ, para a reciclagem de aproximados 12,1 kg, sendo necessário outros 1.900 MJ para a produção.

A reciclagem é dependente da tecnologia empregada para a recuperação de metais (aço, alumínio, cobre, níquel, chumbo, zinco, entre outros), plásticos (policarbonato, poliestireno, polietileno, acrilonitrilo-butadieno-estireno entre outros) e também o vidro. (WILLIAMS, 2003). Para a reciclagem de eletroeletrônicos existem vários processos como a pirometalurgia, eletrometalurgia, hidrometalurgia e os processos mecânicos de cominuição, classificação e separação, nos quais o menos agressivo é o processo mecânico

por gerar menos resíduos danosos aos humanos e seres vivos em geral (SEABRA, 2012; OLIVEIRA, 2010).

3.3 – A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade avalia os efeitos das alterações ou substituições de variáveis nos resultados finais obtidos em um cenário referencial. Nesse estudo foi assumido como cenário para a comparação o Cenário de Referência para a unidade funcional que utiliza o monitor CRT com as mudanças de variáveis efetuadas nas fases de produção, distribuição e uso e no Cenário (2) com CRT a variável de energia para a reciclagem.

Nessa análise para o Cenário de Referência foram alterados o mix energético da fase de produção, a variável da distância rodoviária da fase de distribuição e o mix energético da fase de uso, para o Cenário (2) foi alterada a variável de energia no processo de reciclagem, com intervalo de 30% de decréscimo e de acréscimo. O efeito dessas alterações é a forma de análise e posterior confirmação da sensibilidade do sistema ao longo do ciclo de vida.

Para essa análise foram modelados três cenários, sendo o Cenário de Sensibilidade (1) e o Cenário de Sensibilidade (2) contendo três situações de alteração em cada e no Cenário de Sensibilidade (3) foi composto por outras duas situações.

A cada situação alterada foi considerado o efeito da mesma em comparação com o cenário referencial adotado e ao final do conjunto com três situações foram apurados os resultados obtidos e comparados entre si os Cenários de Sensibilidade (1 e 2). Para o Cenário de Sensibilidade (3) foi considerado as alterações pertinentes à geração energética e efetuado a verificação de consistência de dados como efeito de percentagens para mais ou para menos.

3.4 – AVALIAÇÕES DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Para a avaliação dos impactos ambientais foram escolhidos como ferramentas, um conjunto composto pelo *software* GaBi de compilação 7.3 e sua base de dados Educacional de 2017 adicionado ao método CML 2001 (Nov. 2010). As categorias de Potencial de Acidificação (PA – kg SO₂ eq.), Potencial de Aquecimento Global (PAG – kg CO₂ eq.), Potencial de Eutrofização (PE – kg PO₄ eq.) e Depleção Abiótica Fóssil (DAF – kg Sb eq.)

foram consideradas, bem como as informações relacionadas ao Uso de Energia (UE - MJ) e ao Uso de Água (UA - kg) durante todo o ciclo de vida dos equipamentos.

Para a água apurada no levantamento do inventário dos equipamentos foi utilizado o termo Uso de Água, como toda a utilização ou retirada necessária aos processos de fabricação das partes dos mesmos. O termo consumo é utilizado para água que é removida e não devolvida (ISO 14046, 2014). Nesse estudo, o volume de água para a entrada é totalmente devolvida à natureza e poderá ser reutilizada, porém, com alterações por terem em sua composição os resíduos de emissões pertinentes à fabricação de dispositivos, necessitando de tratamento.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – IMPACTOS AMBIENTAIS DOS CENÁRIOS DE REFERÊNCIA

O Cenário de Referência apresentou para as categorias de impacto de aquecimento global (kg CO₂ eq.), acidificação (kg SO₂ eq.), eutrofização (kg PO₄ eq.) e depleção abiótica (kg Sb eq.), bem como os consumos de água e energia, os percentuais demonstrados na Figura 7 para as fases de produção, distribuição e uso dos equipamentos eletroeletrônicos.

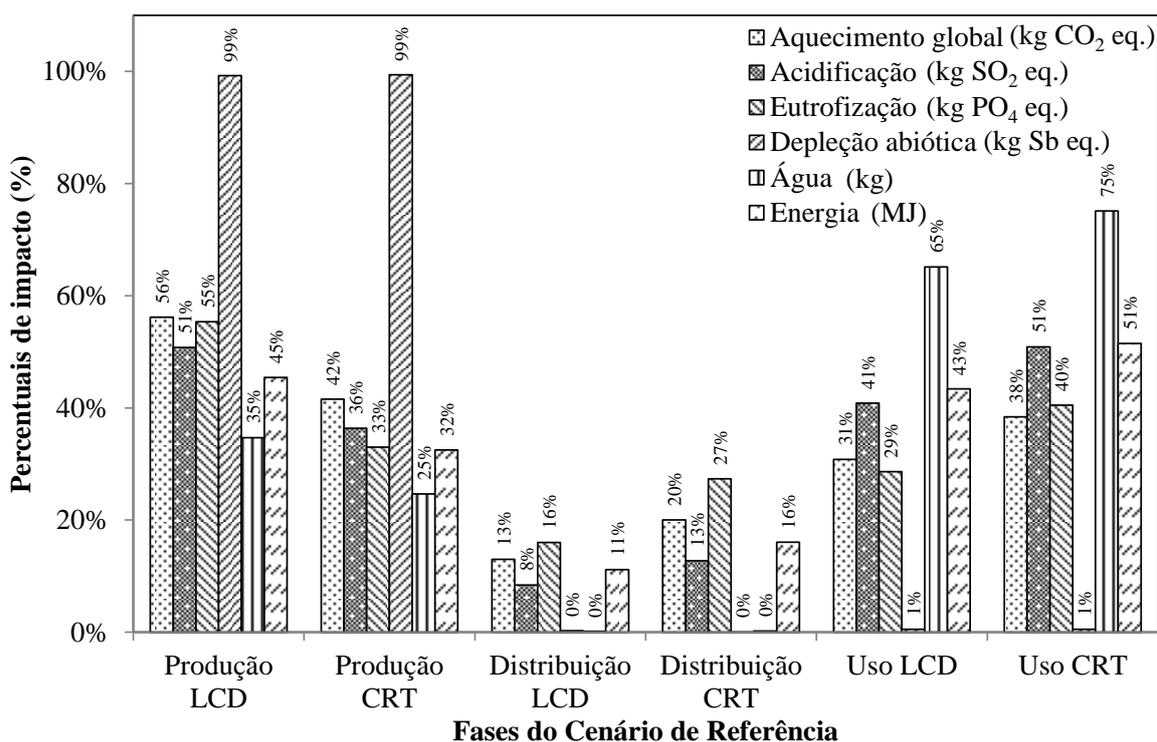


Figura 7 – Impactos ambientais por fase do ciclo de vida do Cenário de Referência LCD e CRT.

Na análise da Figura 7, podemos observar que a fase de produção e a fase de uso detiveram os maiores valores percentuais em todas as categorias de impactos de todo o ciclo de vida, ficando então a fase de distribuição com os menores índices da carga ambiental do Cenário de Referência em ambos os tipos de monitores. Esta análise tornou-se semelhante ao estudo dos pesquisadores Choi *et al.* (2006).

Os resultados encontrados para o potencial de aquecimento global nas fases de produção, uso e distribuição do Cenário de Referência com CRT apresentaram percentuais de 42%, 38% e 20% respectivamente. Já considerando as mesmas fases do Cenário de Referência LCD, foram apresentados como 56%, 31% e 13% respectivamente. Os valores obtidos estão de acordo com o estudo de Teehan *et al.* (2012), que apresentaram para

aquecimento global a média de 58% para a fase de uso, 39% para a fase de manufatura e pequeno impacto para a fase de distribuição. Como os maiores contribuintes para esse resultado no computador com monitor CRT têm-se 28% para as placas de circuito integrado, disco rígido e fonte de alimentação, 42% para geração energética e 17% para o meio de transporte aéreo. Já para a unidade funcional com monitor de LCD temos 29% para as placas de circuito integrado, disco e fonte de alimentação, 31% para a energia e 23% para o processo de auxiliares de montagem da tela de LCD.

Para o potencial de acidificação os percentuais auferidos foram detectados pelas emissões no ar, na água e no solo, como principal destaque às emissões no ar dos componentes inorgânicos como amônia (NH_3), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e outros, principalmente nos processos da fonte de alimentação, disco rígido, placa mãe, placa de circuito integrado e tubo de raio catódico que juntos somam 30% desse total e a energia que apresentou como 51% para o computador com monitor CRT. Para o computador que usa o monitor LCD temos o processo de energia com 41%, o gabinete e todos os componentes com 19% e o monitor com 30%, sendo os mais representativos dessa categoria. As fases de produção e de uso para as duas opções de monitor, foram as que contaram com as maiores incidências desse impacto.

O potencial de eutrofização obtido foi procedente na fase de produção, de uso e de distribuição contando com 55%, 29% e 16% para o Cenário de Referência com LCD e nas mesmas fases para o Cenário de Referência com CRT contou com 33%, 40% e 27%. Esses percentuais tem como causa as emissões para o ar e para a água de óxidos de nitrogênio (NO_x), fosfato (PO_4^{3-}) e amônio (NH_4^+) associados ao consumo de nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) provenientes da extração de recursos naturais, para a fabricação do vidro do funil e vidro do painel do monitor CRT com aproximados 99% do total encontrado. Para o computador com LCD temos o gabinete e seus componentes com 17%, o monitor e processos anexos com 36% e a energia com 29%, perfazendo-se como os maiores contribuintes da carga ambiental da categoria.

Uma particularidade notável é o potencial de depleção abiótica, que apresentou um valor muito baixo nas fases de distribuição e fase de uso, sendo a quase totalidade (99%) na fase de produção das duas opções de Cenário de Referência (CRT e LCD). Esta categoria de impacto tem fundamental importância por ter influência direta na visualização da escassez de recursos e elementos, inerentes aos aspectos físicos, químicos ou físico-químicos do ecossistema que pode ser atingido de forma global. O impacto obtido para o

Cenário de Referência CRT para esta categoria foi derivado do consumo dos elementos principais e seus percentuais como a prata (32%), o chumbo (27%), o cobre (18%), o zinco (9%), o ouro (8%) e os demais 6% ficaram a cargo de outros elementos como o antimônio, sulfato de bário, borax, cloreto de cálcio, molibdênio e demais.

Para o Cenário de Referência LCD os impactos da categoria de depleção abiótica seguiram a mesma característica de baixos valores e percentuais similares aos mesmos elementos apresentados no Cenário de Referência CRT. Particularmente foram observados o aumento percentual na prata, no cobre, no zinco e no ouro que ficaram com 34%, 19%, 10% e 9% respectivamente, e o decréscimo no chumbo e nos demais, apresentando os valores de 24% e 4% sequencialmente. Para esse impacto na opção com monitor CRT, os resultados obtidos foram de 30% para processos do disco rígido, fonte de alimentação e placas de circuito integrado, 30% para a eletricidade, 26% para o querosene que foram os maiores contribuintes. Já para a opção de computador com LCD temos 23% para energia, 34% para o monitor no qual os processos auxiliares do cristal líquido foram maiores, 23% para o gabinete com processos de disco, fonte e placas e finalmente o querosene com 18% do resultado obtido.

O processo de mix energético chinês utilizado para a produção do computador e do monitor foi obtido a partir de recursos como o carvão, o óleo pesado, gás natural e a água como as principais fontes de oferta. O uso de água e de energia foi apresentado com maior relevância nas fases de produção e na fase de uso dos computadores. A fase de uso apresentou os maiores percentuais devido à geração elétrica para o uso dos aparelhos demandada pelo tempo de vida útil (4 anos) e foi modelado com mix energético brasileiro que é característico hidroelétrico, ou seja, necessitou da água como insumo e também foi associado todos os gastos energéticos para a sua produção elétrica. Na fase de produção o consumo ficou elevado devido à extração dos materiais e o seu processamento com modelagem de processo de mix chinês. No estudo de Duan *et al.* (2009), verificou-se que a produção energética da China é proveniente de combustíveis fósseis, os quais são causadores de grandes impactos.

Quando avaliadas as fases do Cenário de Referência em ambas as opções de monitores, notou-se algumas divergências e equidades a eles pertinentes em vários aspectos. O uso de energia mais visível ficou a cargo das fases de produção e de uso. A extração e o processamento da matéria-prima na fase de produção demandaram grande quantidade de energia e a fase de uso utilizou a eletricidade como o insumo principal para

o funcionamento do computador. Com isso os maiores percentuais de aquecimento global se apresentaram nessas fases.

No total dos impactos para o Cenário de Referência CRT, a categoria de aquecimento global para as fases de uso e de produção responderam a 80% e para o Cenário de Referência LCD, tal potencial impacto respondeu por 87% para as mesmas fases. Para Socolof *et al.* (2005), o ciclo de vida dominado pela energia na fabricação torna o impacto de aquecimento global extremamente visível e ainda impulsionado pelo uso de eletricidade, devido a essa geração elétrica emitir grandes quantidades de CO₂.

Considerando a água total utilizada na fase de uso, foi obtido pelo Cenário de Referência LCD um consumo que ultrapassou em mais de 12% do volume relacionado ao Cenário de Referência CRT. Para o uso energético a avaliação obteve a margem de 9% a mais para o LCD em relação ao CRT.

Os impactos ambientais com valores absolutos para as quatro categorias de impacto analisadas no trabalho, bem como o uso de água e de energia para o Cenário de Referência, alternando os monitores entre LCD e CRT, são mostrados na Tabela 7 para os dois monitores.

A partir da análise da Tabela 7 aliadas à Figura 7 pode-se identificar que os maiores impactos obtidos no Cenário de Referência CRT e Cenário de Referência LCD estão nas fases de produção e fase de uso, ficando os menores impactos a cargo da fase de distribuição, como também encontrado por Song *et al.* (2013), que afirmou que na fase de distribuição mesmo quando se tem grandes distâncias, os impactos permanecem muito baixos em relação às outras fases.

Tabela 7 – Impactos ambientais para o Cenário de Referência CRT e LCD.

Impactos	Produção	Distribuição	Uso	Total
Cenário de Referência com CRT				
PAG (kg CO ₂ eq.)	5,24 x 10 ²	2,52 x 10 ²	4,84 x 10 ²	1,26 x 10 ³
PA (kg SO ₂ eq.)	2,25 x 10 ⁰	7,90 x 10 ⁻¹	3,15 x 10 ⁰	6,19 x 10 ⁰
PE (kg PO ₄ eq.)	1,83 x 10 ⁻¹	1,55 x 10 ⁻¹	2,30 x 10 ⁻¹	5,68 x 10 ⁻¹
DAF (kg Sb eq.)	3,29 x 10 ⁻²	3,00 x 10 ⁻⁵	1,70 x 10 ⁻⁴	3,31 x 10 ⁻²
UA (kg)	5,77 x 10 ⁵	5,02 x 10 ³	1,76 x 10 ⁶	2,34 x 10 ⁶
UE (MJ)	6,79 x 10 ³	3,35 x 10 ³	1,08 x 10 ⁴	2,09 x 10 ⁴
Cenário de Referência com LCD				
PAG (kg CO ₂ eq.)	6,80 x 10 ²	1,57 x 10 ²	3,73 x 10 ²	1,21 x 10 ³
PA (kg SO ₂ eq.)	3,02 x 10 ⁰	5,00 x 10 ⁻¹	2,43 x 10 ⁰	5,95 x 10 ⁰
PE (kg PO ₄ eq.)	3,42 x 10 ⁻¹	9,90 x 10 ⁻²	1,77 x 10 ⁻¹	6,06 x 10 ⁻¹
DAF (kg Sb eq.)	2,60 x 10 ⁻²	6,90 x 10 ⁻⁵	1,31 x 10 ⁻⁴	2,62 x 10 ⁻²
UA (kg)	7,21 x 10 ⁵	3,20 x 10 ³	1,35 x 10 ⁶	2,08 x 10 ⁶
UE (MJ)	8,68 x 10 ³	2,13 x 10 ³	8,29 x 10 ³	1,91 x 10 ⁴

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

Dentro da avaliação do uso de energia e de água nos Cenários de Referência CRT e LCD apresentaram menores índices na fase de distribuição, aumentando seus valores na fase de produção e chegando a altos índices na fase de uso. O alto índice para o uso de energia e de água na fase de uso está ligado à energia elétrica para a utilização do computador. No estudo dos pesquisadores Choi *et al.* (2006), a utilização de eletricidade encontrado na fase de uso também foi significativo além de contribuir para várias categorias de impacto.

Para ambos os monitores foram observados grandes volumes de emissões e, principalmente, no que concerne às emissões para a água com médias aproximadas a 97 % do total, às emissões para o ar com 3% e às emissões para o solo abaixo de 1% do total.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos para as emissões do Cenário de Referência CRT e LCD. A Tabela 8 fornece a informação na qual o monitor CRT obteve o maior valor no total para as emissões evidenciando que sua carga ambiental é mais prejudicial, sendo responsável pelo acréscimo de aproximadamente 13% maior na comparação com as emissões resultantes do monitor LCD no Cenário de Referência.

Tabela 8 – Emissões do Cenário de Referência CRT e LCD.

Emissões	Cenário de Referência CRT	Cenário de Referência LCD
Emissões para a água (kg)	$2,29 \times 10^6$	$2,03 \times 10^6$
Emissões para o ar (kg)	$7,31 \times 10^4$	$6,07 \times 10^4$
Emissões para o solo (kg)	$1,96 \times 10^{-3}$	$2,14 \times 10^{-3}$
Total de emissões (kg)	$2,36 \times 10^6$	$2,09 \times 10^6$

O potencial de aquecimento global, observado no Cenário de Referência CRT com dados apresentados na Tabela 7, apresentou 96% do total das emissões para o ar com dióxido de carbono (CO_2), seguidos por 4% restantes por emissões de metano (CH_4), tetrafluoretano (CF_4) e hexafluoretano (C_2F_6). Para os resultados do potencial de aquecimento global do Cenário de Referência LCD, mostrados na Tabela 7, as emissões para o ar foram de 93% do total com dióxido de carbono (CO_2), e as emissões de metano 4% e os demais 3% são atribuídos aos halogenados. O Cenário de Referência CRT apresentou maior impacto de aquecimento global comparado ao Cenário de Referência LCD.

O potencial de aquecimento global ou mudanças climáticas em estudo feito por Bhakar *et al.* (2015), o qual foi realizado somente com monitores, resultaram em torno de 750 kg de CO_2 eq. para o monitor CRT e para o LCD aproximadamente 250 kg de CO_2 eq. sendo que os percentuais desse impacto são maiores na fase de produção e de uso. No estudo de Song *et al.* (2013), o computador composto pelo gabinete e os dois monitores, mouse e teclado apresentaram como resultado um valor aproximado de 1.785 kg de CO_2 eq. e os maiores valores para o impacto também foram apresentados nas fases de uso e produção. Nesse estudo foi apurado para o potencial de aquecimento global o conjunto de computador e monitor CRT o valor de 524 kg de CO_2 eq. e para o gabinete e monitor LCD foi apresentado 680 kg de CO_2 eq. na fase de produção.

As incertezas verificadas nas comparações a outros estudos podem ser geradas pelas diferenças nos métodos adotados, complexidade e completude dos dados apurados para inventários, atualização da base de dados e processos envolvidos a um computador e seus dispositivos tornando uma avaliação dependente de comparações com a literatura e intervalos de valores presentes nesses estudos (TEEHAN, 2012).

Para os impactos referentes ao potencial de acidificação tanto no Cenário de Referência CRT quanto no LCD temos os resultados voltados às emissões no ar, na água e no solo cujas predominâncias das emissões inorgânicas no ar perfizeram a média de 99,9%

do total. No Cenário de Referência CRT, as emissões contaram com a presença do dióxido de enxofre (SO₂) com 68%, seguidos por óxidos de nitrogênio (NO_x) com 27% e pelos compostos de cloreto de hidrogênio (ácido clorídrico, (HCl)), fluoreto de hidrogênio (ácido fluorídrico, (HF)) e sulfato de hidrogênio (ácido sulfúrico, (H₂SO₄) e as demais com os 5% restantes. No Cenário de Referência com LCD os resultados obtidos para as emissões contaram com os seguintes elementos e valores percentuais: para SO₂ com 67%, seguidos por 26% para NO_x e os 7% para o grupo formado por HCl, HF, H₂SO₄ e demais.

Para o potencial de eutrofização é notado na Tabela 7 que essa categoria obteve maiores valores para a unidade funcional com o uso de monitor LCD devido às emissões ocasionados pelos materiais auxiliares de montagem do cristal líquido e do monitor, por possuírem em sua composição química, elementos como nitrogênio e óxidos nitrosos emitidos para o ar e para a água.

No Cenário de Referência, especificamente na fase de produção, os impactos obtidos para os componentes são apresentados na Figura 8(A) para a opção com CRT e 8 (B) para a opção de LCD.

Na Figura 8(A) as placas de circuito impresso obtiveram os maiores valores em média para todos os impactos nessa fase, seguidos pelo tubo de raio catódico (vidro) e da fonte de alimentação (metais e PCI). No Cenário de Referência com LCD no que tange à fase de produção, os impactos resultantes dos componentes são apresentados na Figura 8 (B), na qual se observa que novamente as placas de circuito impresso obtiveram os maiores valores de média para todos os impactos. Nessa fase ficou destacado o potencial de eutrofização com 54% do total de impactos, seguidos pela eletricidade, fonte de alimentação que detêm na sua composição os metais e as placas de CI, continuando pelo disco rígido e os componentes do cristal líquido como a retroiluminação e os polarizadores.

No Cenário de Referência o resultado encontrado foi semelhante ao relatado em um estudo feito por Bhakar *et al.* (2015) e Teehan *et al.* (2012), no qual afirmaram que existe uma grande contribuição aos impactos e mudanças climáticas ocasionado pelas placas de circuito integrado.

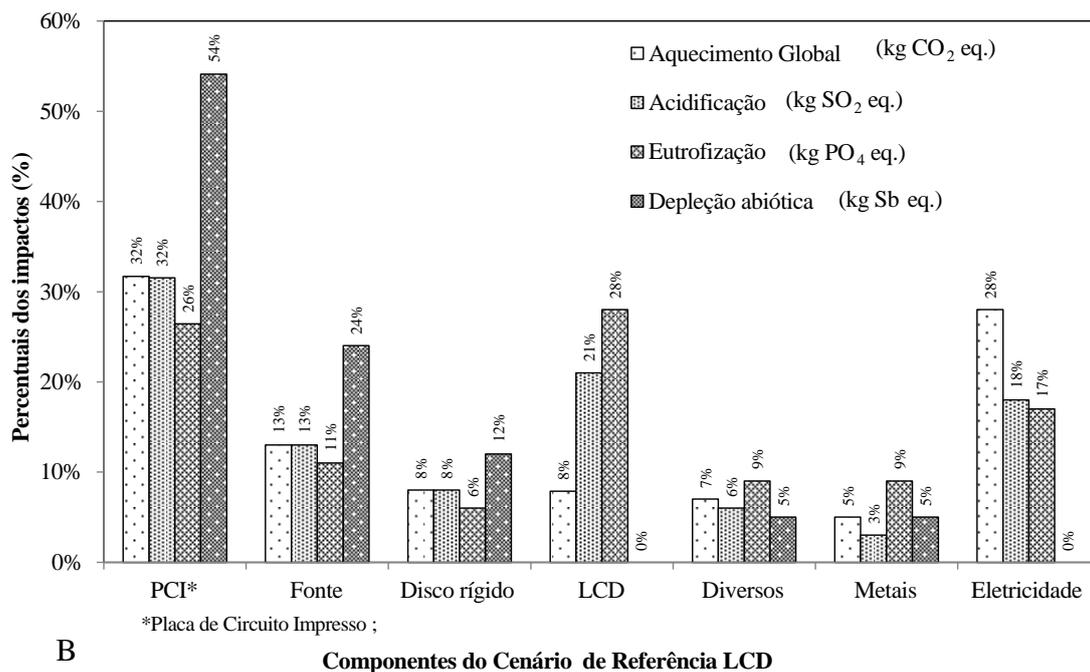
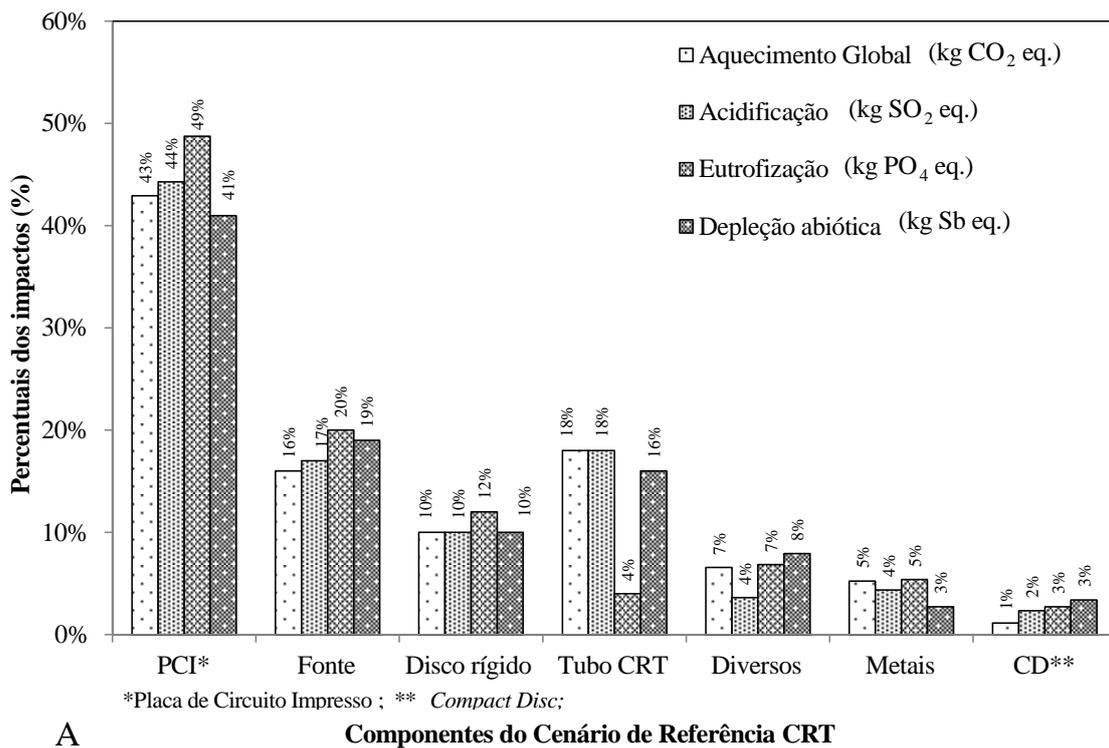


Figura 8 – A) Contribuintes dos impactos do Cenário de Referência CRT – Fase de uso; B) Contribuintes dos impactos do Cenário de Referência LCD - Fase de produção.

A partir da Figura 8 (A) e 8 (B) ficou notória a dominância das placas de circuito impresso aos impactos, devido aos grandes percentuais atingidos por elas na fase de produção resultantes do Cenário de Referência nas duas opções de monitores. Essa posição foi alcançada pela quantidade de dispositivos menores como resistores, capacitores,

transistores e diodos presentes em sua estrutura que requerem juntos uma grande quantidade de matéria-prima e energia. Dentre alguns materiais presentes em suas composições estão elementos como ácidos, fluoretos, nitrogênios, peróxidos, químicos orgânicos, solventes, prata, estanho, níquel e cobre dentre outros. Em todas as categorias de impacto obteve grandes percentuais totais cujo potencial de eutrofização, 88% desse impacto são devidos à emissão de inorgânicos no ar e os outros 12% na água e solo. Para Choi *et al.* (2006), os maiores impactos atribuídos à fase de produção são decorrentes de peças pequenas e da variedade de componentes eletrônicos que consomem quantidade substancial de materiais e energia.

Os resistores, capacitores, transistores e diodos foram responsáveis por grandes percentuais de emissão para o ar de dióxido de carbono e metano na categoria de aquecimento global. Essas peças consomem elementos como chumbo, cobre, prata, ouro, estanho e zinco, o que evidenciam a depleção abiótica. Nas emissões para o ar, na categoria de acidificação temos como resultado a liberação de óxidos nitrosos e dióxido de enxofre. Para a categoria de eutrofização as emissões provocadas pelo uso dessas peças para a água e para o ar incidem com os elementos como a amônia, nitrogenados, nitratos, fosfato e fósforo. Essas emissões e consumo elevaram os percentuais dos impactos analisados.

Em termos mássicos as placas de circuito integrado com os seus componentes menores são responsáveis por aproximadamente 7% da massa total, porém resultam em aproximados 26% dos impactos apurados nessa avaliação.

A Figura 9 apresenta a participação dos impactos ambientais e o uso de água e energia na fase de produção do Cenário de Referência. O Cenário de Referência CRT obteve maiores impactos do que o Cenário de Referência LCD, portanto cabe a observação de que à fase de produção é agregada a extração e processamento de matéria-prima, em que o peso mássico é um fator relevante.

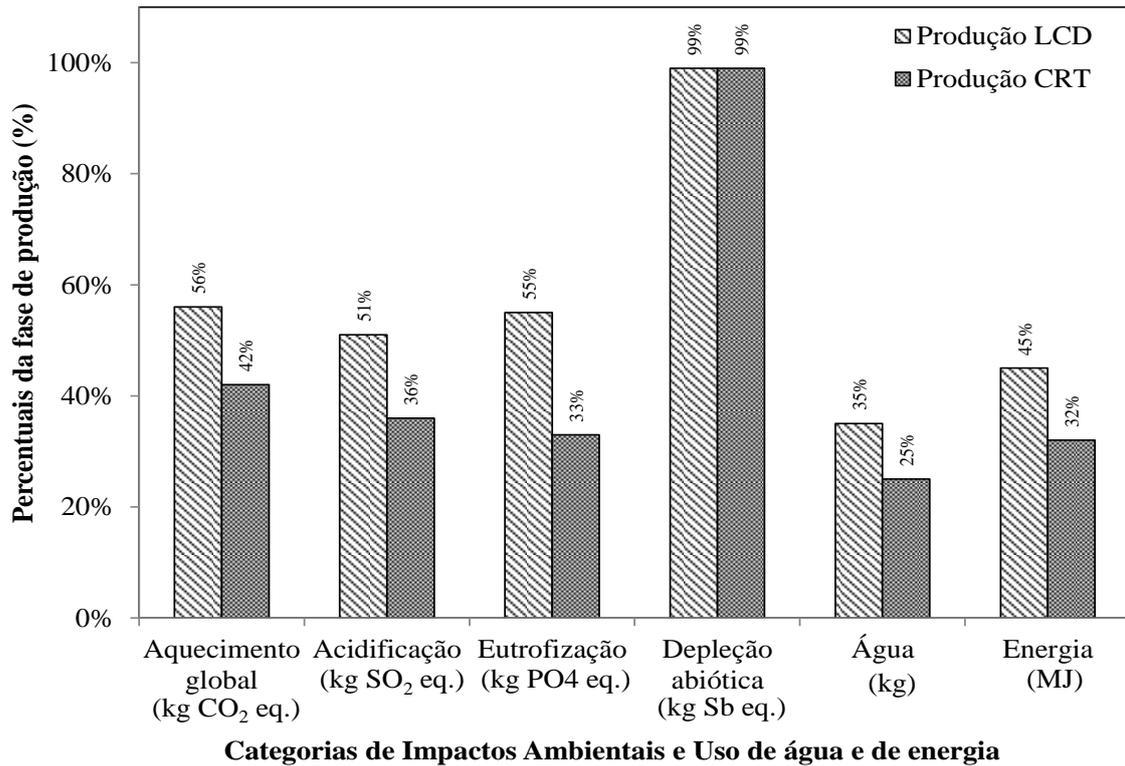


Figura 9 – Impactos ambientais e uso de água e de energia da fase de produção relativos ao ciclo de vida total do Cenário de Referência.

Como o Cenário de Referência CRT possui o peso mássico de 24,3 kg e o Cenário de Referência LCD possui 15,5 kg de massa, ficou evidente que a tecnologia empregada nesse cenário com LCD proporcionou a mitigação dos impactos, ou seja, caso seja empregada as mesmas características tecnológicas do Cenário de Referência LCD à quantidade de massa do Cenário de Referência CRT, temos a proporção a ser acrescida pelo fator de 1,567 ($24,3 / 15,5 = 1,567$), gerando para todas as categorias de impacto e para os consumos, novos valores proporcionais que ultrapassariam a atual proporção agregada à produção do Cenário de Referência CRT.

Na fase de distribuição foi necessário o uso de duas formas de transporte, o aéreo para o deslocamento da China ao Brasil com a distância linear de 18.000 km, e o transporte rodoviário para roteiros entre os Centros de Distribuição e as capitais estaduais, conforme descrito na metodologia, atingindo uma média de 2.000 km. No transporte aéreo o combustível utilizado foi o querosene e no rodoviário o diesel. Os resultados para os potenciais impactos ambientais e uso de água e de energia do Cenário de Referência CRT e LCD são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Impactos e consumos de água e de energia na fase de distribuição do Cenário de Referência.

Item	PAG* (kg CO ₂ eq.)	PA* (kg SO ₂ eq.)	PE* (kg PO ₄ eq.)	DAF* (kg Sb eq.)	UA* (kg)	UE* (MJ)
Cenário de Referência LCD						
Transporte 1**	1,36x10 ²	3,68x10 ⁻¹	8,66x10 ⁻²	-	-	-
Transporte 2**	3,91x10 ⁰	5,16x10 ⁻³	3,69x10 ⁻³	-	-	-
Querosene	2,03x10 ¹	1,28x10 ⁻¹	8,82x10 ⁻³	5,37x10 ⁻⁶	3,18x10 ³	2,11x10 ³
Diesel	1,09x10 ⁻¹	8,88x10 ⁻⁴	6,11x10 ⁻⁵	4,08x10 ⁻⁸	1,86x10 ¹	2,09x10 ¹
Totais	1,60x10 ²	5,02x10 ⁻¹	9,92x10 ⁻²	5,41x10 ⁻⁶	3,20x10 ³	2,13x10 ³
Cenário de Referência CRT						
Transporte 1**	2,14x10 ²	5,77x10 ⁻¹	1,36x10 ⁻¹	-	-	-
Transporte 2**	6,14x10 ⁰	8,11x10 ⁻³	5,80x10 ⁻³	-	-	-
Querosene	3,19x10 ¹	2,01x10 ⁻¹	1,39x10 ⁻²	5,78 x 10 ⁻⁶	4,99x10 ³	3,32x10 ³
Diesel	1,72x10 ⁻¹	1,39x10 ⁻³	9,60x10 ⁻⁵	6,41 x 10 ⁻⁸	2,92x10 ¹	3,29x10 ¹
Totais	2,52x10 ²	7,88x10 ⁻¹	1,56x10 ⁻¹	5,84 x 10 ⁻⁶	5,02x10 ³	3,35x10 ³

* PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

** Transporte 1: Aéreo; Transporte 2: Rodoviário.

Na fase de distribuição a utilização do querosene resultou como o componente que apresentou os maiores impactos e consumos de água e de energia quando comparado a utilização do diesel. Para o uso de aproximadamente 67 kg de querosene no Cenário de Referência CRT foi consumido em média um total de 5.020 kg em recursos renováveis e não renováveis e 2.110 MJ de energia. Para os recursos renováveis a média de utilização de água foi de 4.970 kg com mais 32 kg de CO₂ e para os recursos não renováveis em torno de 7 kg dos materiais como carbonato de cálcio, rocha inerte e outros. Já para a utilização do diesel em 0,657 kg, foi consumido um total de 30 kg de recursos renováveis e não renováveis. Para a produção e a utilização dos combustíveis, a média de uso de água ficou em torno de 97% de todo o processo.

Na fase de distribuição do Cenário de Referência LCD, consumiram-se aproximadamente 43 kg de querosene e 420 g diesel. Para o consumo do querosene nessa fase, foi utilizado um montante de 3.180 kg de entrada de materiais e insumos para sua produção e refino e para o consumo de diesel foi utilizada a entrada de um total de 19 kg de recursos renováveis e não renováveis. Para a utilização dos dois combustíveis foi necessária a geração de 2.135 MJ de energia e desta geração, o querosene resultou no

consumo de 2.114 MJ. Nesse cenário a média de recurso hídrico (97%) assemelhou-se ao Cenário de Referência CRT.

Na comparação entre os dois modos do Cenário de Referência, nessa fase de distribuição, o Cenário de Referência com CRT por ocasião da massa maior e da tecnologia empregada na produção, obteve o resultado de maior gerador de impactos em todas as categorias seguido também pelo uso de água e energia com grandiosos valores.

A fase de distribuição não é considerada por alguns autores. A distribuição não ocasiona impactos relevantes em termos de MJ ou kg CO₂ eq., mas esses pequenos impactos não indicam que esta fase seja ambientalmente benigna (TEEHAN *et al.*, 2012).

A partir da Figura 10, a qual apresenta os impactos da fase de uso do computador em relação aos impactos totais, ficaram visíveis que os usos de energia e de água foram os grandes geradores dos potenciais impactos, com isso coube a análise dos processos responsáveis pelos mesmos, nos quais foi identificada a geração hidrelétrica como a responsável pelos consumos.

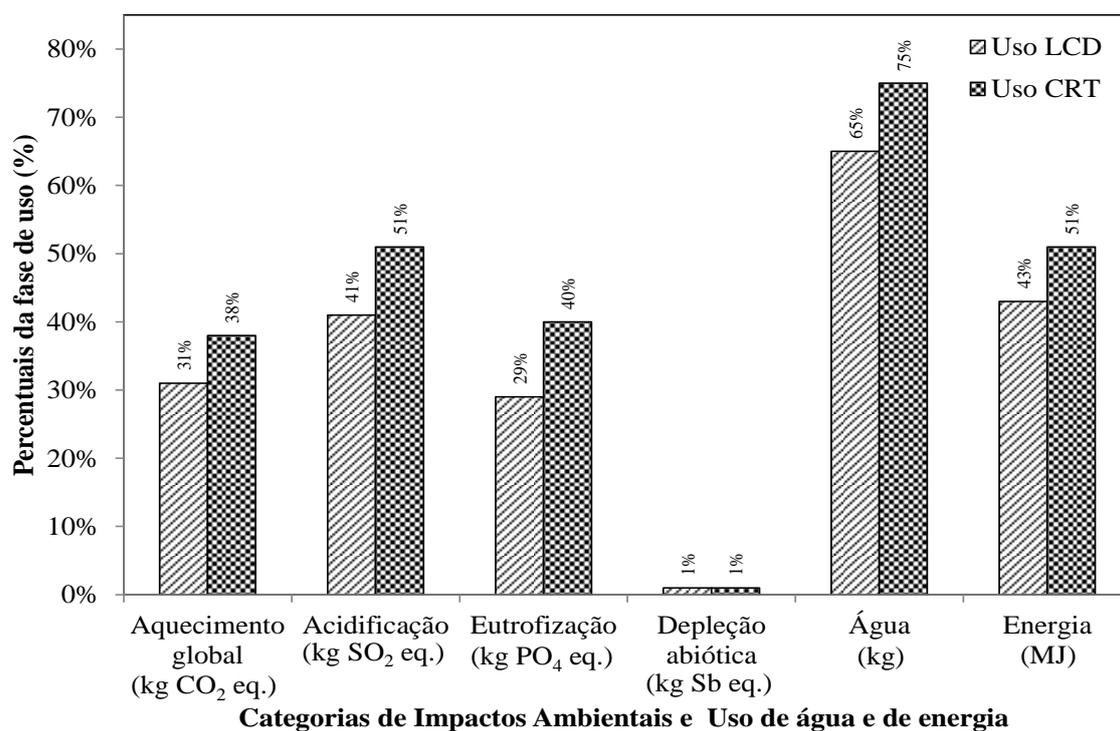


Figura 10 – Impactos ambientais e uso de água e de energia na fase de uso relativos ao ciclo de vida total do Cenário de Referência.

Para o uso doméstico ou profissional com tempo de vida útil fixado em quatro (4) anos, o computador com monitor LCD necessitou de aproximados 4.180MJ de

eletricidade, da geração energética de 8.290MJ e de 1.350m³ de água, ou seja, em média o dobro da geração energética e 0,32m³/MJ de água para o uso elétrico, o que seguiu como uma constante verificada no uso do computador com monitor CRT, que utilizou aproximadamente 5.420 MJ de eletricidade, a geração de 10.800MJ de energia e foram utilizados 1.760m³ de água. Devido ao processo de geração energética acumular todos os gastos energéticos dos insumos necessários à produção elétrica, existe ainda a particularidade de que a energia é gerada por fonte hidroelétrica, contribuindo para que os totais de uso tanto para água e para energia sejam aparentemente grandes.

Em estudos de ACV o uso de energia primária possui grandes variações desde 580MJ a 16.800 MJ (WILLIAMS, 2004(1); KEMMA *et al.*, 2005. TEEHAN *et al.*, 2012). Nesse estudo o uso de energia obtido se apresentou entre 1910 MJ para a unidade funcional com monitor LCD e com 2090 MJ para a unidade com o monitor CRT, estabelecendo-os dentro desse intervalo.

A fase de uso foi limitada ao Brasil, onde o processo de energia disponível no *software* GaBi que se assemelha ao Balanço Energético do ano de 2016 o qual apresenta como 68% a oferta energética como de geração hidráulica (MME, 2017) validam juntos o resultado tabulado. A energia hidrelétrica consumiu menos recursos fósseis e emitiu menos resíduos, como afirmou Song *et al.* (2013), caracterizando a fonte hidrelétrica como mais limpa dentro de um ciclo de vida de eletrônicos.

4.2 – COMPARAÇÕES ENTRE OS CENÁRIOS DE FIM DE VIDA

Nesse estudo foram identificados outros dois cenários para o fim de vida, sendo o Cenário (1) para a reutilização (Reuso) e o Cenário (2) para a reciclagem, como formas de avaliações detalhadas para cada alternativa ao fim de vida dos computadores de mesa (*Desktops*).

Para a alternativa de reuso foi assumida a extensão do tempo de vida útil dos equipamentos não sendo necessária a desmontagem, separação ou segregação para o reaproveitamento somente de partes e, sim, a inserção de mais um circuito integrado de memória como melhoria do potencial de processamento para o atendimento de outro público pelo computador completo. Para essa finalidade foi usado o transporte de carga de pequeno porte movido a diesel, com as distâncias dos trajetos calculados de forma linear sendo o ponto de saída de Brasília-DF aos extremos do Estado de Goiás, perfazendo uma média de 500 km.

Para a alternativa de reciclagem foram assumidos os percentuais por peso baseados em estudo de Jönbrink *et al.* (2007), conforme Tabela 6.

4.2.1 – O Reuso

Os impactos ambientais e o uso de água e de energia resultantes do Cenário (1) foram comparados aos impactos e os usos encontrados no Cenário de Referência, em que os percentuais desses acréscimos foram tabulados e estão demonstrados na Tabela 10 para os dois cenários com as opções de LCD e de CRT.

Tabela 10 – Impactos e uso de água e de energia com adição do Reuso – Comparação entre o Cenário de Referência com o Cenário (1).

Impactos	Cenário de Referência LCD	Cenário (1) LCD	% de aumento entre Cenário (1) e Cenário de Referência
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,21x10 ³	1,42x10 ³	17%
PA (kg SO ₂ eq.)	5,95x10 ⁰	7,25x10 ⁰	22%
PE (kg PO ₄ eq.)	6,18x10 ⁻¹	7,10x10 ⁻¹	15%
DAF (kg Sb eq.)	2,62x10 ⁻²	2,63x10 ⁻²	0,38%
UA (kg)	2,03x10 ⁶	2,77x10 ⁶	33%
UE (MJ)	1,91x10 ⁴	2,35x10 ⁴	23%

Impactos	Cenário de Referência CRT	Cenário (1) CRT	% de aumento entre Cenário (1) e Cenário de Referência
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,26x10 ³	1,52x10 ³	20%
PA (kg SO ₂ eq.)	6,19x10 ⁰	4,81x10 ⁰	26%
PE (kg PO ₄ eq.)	5,68x10 ⁻¹	6,82x10 ⁻¹	20%
DAF (kg Sb eq.)	3,31x10 ⁻²	3,34x10 ⁻²	0,91%
UA (kg)	2,34x10 ⁶	3,22x10 ⁶	36%
UE (MJ)	2,09x10 ⁴	2,64x10 ⁴	26%

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

Os percentuais evidenciaram que o computador com o monitor CRT possui os potenciais mais negativos quando aumentado o seu tempo de vida. Em uma sequência de forma crescente para o uso e depois para as categorias de impacto, temos para os percentuais de uso de água e de energia, logo em seguida, está para as categorias de

impactos de acidificação, eutrofização, aquecimento global e finalmente a depleção abiótica.

A avaliação quanto às diferenças encontradas nas comparações entre os cenários, temos no Cenário de Referência e Cenário (1) para o LCD a mesma sequência para o crescimento percentual tanto para os consumos quanto para os impactos.

Em uma análise feita entre as razões das diferenças percentuais obtidas nas comparações dos cenários, com especificação direcionada a cada impacto, foi observado que as categorias de depleção abiótica e de potencial de acidificação obtiveram os menores índices de crescimento, em oposição à categoria de aquecimento global que alcançou a maior razão. Essas particularidades foram observadas devido ao transporte que não acrescentou grandes valores ao quadro geral e, em especial, a categoria de depleção abiótica que não contribuiu com nenhum aumento, também não houve grande aumento para a categoria de potencial de eutrofização que atingiu o maior valor com 0,0000018 kg PO₄ eq., para Cenário (1) do CRT. Esse episódio leva à reafirmação, como anteriormente comentado, do estudo de Song *et al.* (2013), sobre a distribuição, que naquela ocasião as distâncias eram continentais e mesmo assim os impactos não foram tão visíveis em relação às outras fases. Para a análise da razão dos percentuais do aquecimento global a diferença está relacionada à placa de memória (PCI) que trouxe em anexo os grandes usos energéticos e aquíferos, seguidos ao uso do cobre, resina epóxi, aço e chumbo para sua fabricação, agrupados à geração do potencial energético para a nova utilização elétrica.

Uma vantagem na adoção para novas produções de computadores com o ciclo de vida previamente caracterizados para a alternativa de reuso, foi o decréscimo na demanda de extrações primárias, uma vez que o tempo de vida estendido em mais dois anos fez com que os impactos obtidos no ciclo de vida que anteriormente foram divididos em quatro anos fossem distribuídos no tempo da nova demanda, ou seja, em seis anos para uma nova incidência extrativa. O suposto aumento alternativo do tempo de demanda acarretou a mitigação em 33,3% na fase de produção, com isso o ciclo de vida do computador quando implantado o reuso minimizou os impactos obtidos, conforme apresenta a Tabela 11.

Os dados tabulados para o reuso no ciclo normal do computador já existente (Tabela 10) e para a adoção ao ciclo de novas produções (Tabela 11), levaram à resultância de que o Cenário (1) com LCD, uma vez com o tempo atual estendido e para as novas produções com previsão da mesma extensão temporal, é o menos prejudicial em impactos

ambientais e proporcionou maior redução nas utilizações de água e de energia para novas extrações e processamento de material.

Tabela 11 – Impacto e uso de água e de energia com a equalização do novo tempo de vida para o Ciclo do Cenário (1) comparado ao Cenário de Referência.

Impactos	Produção	Distribuição	Uso	Reuso	Total	Redução
Cenário (1) LCD						
PAG (kg CO ₂ eq.)	4,53x10 ²	1,57x10 ²	3,73x10 ²	2,07x10 ²	1,19x10 ³	16%
PA (kg SO ₂ eq.)	2,01x10 ⁰	5,00x10 ⁻¹	2,43x10 ⁰	1,30x10 ⁰	6,24x10 ⁰	14%
PE (kg PO ₄ eq.)	2,28x10 ⁻¹	9,90x10 ⁻²	1,77x10 ⁻¹	1,00x10 ⁻¹	6,04x10 ⁻¹	15%
DAF (kg Sb eq.)	1,70x10 ⁻²	6,90x10 ⁻⁵	1,31x10 ⁻⁴	-	1,72x10 ⁻²	34%
UA (kg)	4,81x10 ⁵	3,20x10 ³	1,35x10 ⁶	6,91x10 ⁵	2,53x10 ⁶	9%
UE (MJ)	5,79x10 ³	2,13x10 ³	8,29x10 ³	4,38x10 ³	2,06x10 ⁴	12%
Cenário (1) CRT						
PAG (kg CO ₂ eq.)	3,49x10 ²	2,52x10 ²	4,84x10 ²	2,56x10 ²	1,34x10 ³	12%
PA (kg SO ₂ eq.)	1,50x10 ⁰	7,90x10 ⁻¹	3,15x10 ⁰	1,62x10 ⁰	7,06x10 ⁰	10%
PE (kg PO ₄ eq.)	1,22x10 ⁻¹	1,55x10 ⁻¹	2,30x10 ⁻¹	1,18x10 ⁻¹	6,25x10 ⁻¹	9%
DAF (kg Sb eq.)	2,19x10 ⁻²	3,00x10 ⁻⁵	1,70x10 ⁻⁴	2,50x10 ⁻⁴	2,24x10 ⁻²	33%
UA (kg)	3,85x10 ⁵	5,02x10 ³	1,76x10 ⁶	8,75x10 ⁵	3,02x10 ⁶	6%
UE (MJ)	4,53x10 ³	3,35x10 ³	1,08x10 ⁴	5,49x10 ³	2,41x10 ⁴	9%

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

4.2.2 – A Reciclagem

A reciclagem obteve efeitos diretamente relacionados à fase de produção chinesa e também a distribuição pelo efeito de peso mássico menor a ser transportado da China ao Brasil. Adotando dados percentuais mássicos da Tabela 6 e a energia utilizada para nova produção com material reciclado, que para o computador com CRT foram 1.100 MJ e para o computador com LCD foram 1.900 MJ, o gabinete e os monitores tiveram novos valores para a massa conforme o exposto a seguir: no gabinete (1,78 kg), no monitor CRT (6,16 kg) e no monitor LCD (1,52 kg), a parcela reciclável de cada um dos dispositivos ficou com a totalização percentual de 81%, 58% e 75% respectivamente. Considerando a agregação dos monitores ao gabinete, a média simples tornou-se para o computador com CRT em 69% e o computador com LCD com 78% de massas recicláveis.

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam as emissões no ar, solo e água, os impactos e uso de água e energia na unidade funcional com uso de monitor CRT e LCD.

Quanto às emissões temos a Tabela 12 que apresenta as comparações entre os Cenários de Referência e Cenário (2) para ambos os computadores com os monitores CRT e LCD.

Tabela 12 – Comparações da emissões entre Cenário de Referência e Cenário (2) para CRT e LCD.

Cenários	Emissões no ar*	Emissões na água*	Emissões no solo*
Cenário de Referência CRT	$7,31 \times 10^4$	$2,29 \times 10^6$	$1,10 \times 10^{-3}$
Cenário (2) CRT	$8,08 \times 10^4$	$2,24 \times 10^6$	$5,91 \times 10^{-4}$
Diferença	$+7,70 \times 10^3$	$-5,00 \times 10^4$	$-5,09 \times 10^{-4}$
Diferença (%)	+10%	-2%	-86%
Cenário de Referência LCD	$6,07 \times 10^4$	$2,03 \times 10^6$	$2,14 \times 10^{-3}$
Cenário (2) LCD	$7,63 \times 10^4$	$2,13 \times 10^6$	$5,62 \times 10^{-4}$
Diferença	$+1,56 \times 10^4$	$1,00 \times 10^5$	$-1,58 \times 10^{-3}$
Diferença (%)	+26%	+5%	-74%

*Unidade de peso (kg)

Os objetivos agregados no uso da reciclagem, caracterizada no Cenário (2) com LCD e com CRT foram analisar os efeitos da reciclagem quanto às emissões, impactos ambientais e uso de água e energia em uma nova produção com o mix energético brasileiro, sobre a extração de recursos e consumo de produtos primários.

Podemos observar na Tabela 12 que as maiores reduções em termos de impacto, foram para as emissões no solo. Para as emissões para a água a reciclagem do computador com o monitor CRT resultou em redução, contudo houve o aumento dessas emissões no LCD. Já nas emissões para o ar houveram em ambas as opções, acréscimo nos valores de impacto, sendo maiores no uso do LCD devido à maior demanda de produção energética (1.900MJ) para o uso elétrico na reciclagem.

4.2.2.1 – Cenário (2) LCD comparado ao Cenário de Referência LCD

A Tabela 13 contém os resultados comparativos entre o Cenário de Referência LCD e Cenário (2) LCD.

Observando a Tabela 13 podemos observar que a geração energética e os impactos ambientais obtiveram reduções no Cenário (2) LCD. Quanto aos impactos podemos observar que as reduções seguiram a seguinte ordem crescente: potencial de acidificação,

potencial de aquecimento global, potencial de eutrofização e potencial de depleção abiótica. Quanto ao uso da água, evidencia-se o aumento devido à geração para energia hidroelétrica na matriz brasileira, a qual foi utilizada no processo de reciclagem.

Tabela 13 – Impactos e uso de água e energia comparados entre o Cenário de Referência LCD e Cenário (2) LCD.

Impactos	Cenário de Referência LCD	Cenário (2) LCD	Diferença dos Cenários	Reduções / Acréscimos
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,21x10 ³	8,49x10 ²	-3,61x10 ²	-30%
PA (kg SO ₂ eq.)	5,95x10 ⁰	4,88x10 ⁰	-1,07x10 ⁰	-18%
PE (kg PO ₄ eq.)	6,18x10 ⁻¹	4,04x10 ⁻¹	-2,14x10 ⁻¹	-35%
DAF (kg Sb eq.)	2,62x10 ⁻²	1,31x10 ⁻²	-1,31x10 ⁻²	-50%
UA (kg)	2,03x10 ⁶	2,19x10 ⁶	-1,60x10 ⁵	+8%
UE (MJ)	1,91x10 ⁴	1,59x10 ⁴	-3,20x10 ³	-17%

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

Os valores negativos encontrados na Tabela 13 mostram a redução dos impactos ambientais e de uso de energia, esses números foram considerados como benéficos ao meio ambiente, pois um número negativo para uma categoria de impacto é preferível a um valor positivo.

A utilização de energia obteve reduções na fase de produção devido ao novo volume de extração de matéria prima exigidos por 22% do volume mássico para novos componentes e também pela redução em 32% de uso energético, que no geral resultaram em 17% de redução. Com a redução do uso energético e aquífero o potencial de impacto global é influenciado, conforme estudo de Leão, 2016. Nesse cenário o uso da água obteve um aumento geral de 8%, ocasionados pelo uso de mix hidrelétrico na reciclagem, porém, compensados em 68% pela redução na fase de produção do material restante a novos computadores e também pela redução em 87% na fase de distribuição oriundos ao novo e menor peso.

Para o potencial de depleção abiótica a redução geral obtida foi de 50%. Na fase de distribuição houve uma redução de 79% dessa categoria proveniente da massa em menor quantidade, porém compensados pelo novo uso energético. Esta redução deu-se pelo consumo diminuto dos elementos e recursos não renováveis como o antimônio, cádmio, chumbo, cobre, níquel, tântalo, zinco no computador com LCD observados nas peças como o disco rígido, CD/DVD, fonte e uso de aço, cobre e alumínio. Na distribuição o transporte

aéreo e o rodoviário não contribuíram com nenhuma redução, porém seus combustíveis sofreram reduções e o diesel, mesmo utilizado no transporte com o peso mássico maior do que no aéreo, apresentou as maiores reduções do que o querosene. Nesse estudo a categoria sofreu uma redução total de 50% quando comparada a um cenário padrão, mas em estudo feito por Choi *et al.* (2006), a reciclagem inibiu a carga ambiental em especial no potencial de depleção abiótica.

Na categoria de eutrofização a redução resultante foi de 35%, sendo obtida devido à redução em torno de 61% fase de produção e de 79% na fase de distribuição. As emissões inorgânicas no ar, na água e no solo foram geradas pelo nitrato de amônio, amônia, nitrogenados, fosfato, fósforo e ácido nítrico e no gabinete, disco rígido e no monitor LCD pelo aço, ABS e alumínio.

A redução total atingida pela categoria de potencial de aquecimento global foi de 30%. Na fase de distribuição essa redução atingiu os 79% e na fase de produção de 59%. Na produção os componentes que menos reduziram seus valores para o impacto foram as placas de circuito impresso, presentes em todos os dispositivos, seguidos pelos componentes plásticos como o polipropileno e polietileno e ABS e água. Devido à presença das placas de circuito integrado e a baixa reciclagem assumida as reduções não resultaram em maiores índices.

Na categoria de impacto de acidificação a redução resultante foi de 18%. Contudo a fase de distribuição e produção chegaram a atingir respectivamente 78% e 58% de redução. As reduções nas emissões inorgânicas deram-se no ar pelo dióxido sulfúrico, ácido sulfúrico e nitrogenado, na água pelos inorgânicos: ácido sulfúrico, sulfeto e fluoreto de hidrogênio. No solo os inorgânicos como ácido nítrico pelo uso reduzido do alumínio, cobre e aço em todos os componentes. No gabinete as reduções foram notadas com maior significância nas emissões do disco rígido e na eletricidade, já no monitor LCD no uso do alumínio, aço e polímero ABS.

As reduções dos impactos e utilizações foram alcançadas devido aos baixos volumes da massa extraída. O novo peso, extraído na China, influenciou na produção com a redução do uso de água e energia para extração de matéria-prima e geração energética com recursos fósseis, porém com a utilização do processo de mix energético brasileiro, com característica hidroelétrica resultou em um aumento do uso de água. No transporte também houve influência em decorrência do novo peso.

4.2.2.2 – Cenário (2) CRT comparado ao Cenário de Referência CRT

A Tabela 14 demonstra as comparações entre o Cenário de Referência e o Cenário (2), ambos para CRT.

Tabela 14 – Impactos e uso de água e de energia comparados entre o Cenário de Referência CRT e Cenário (2) CRT.

Impactos	Cenário de Referência CRT	Cenário (2) CRT	Diferença dos Cenários	Reduções / Acréscimos
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,26x10 ³	8,89x10 ²	-3,71x10 ²	-29%
PA (kg SO ₂ eq.)	6,19x10 ⁰	5,03x10 ⁰	-1,16x10 ⁰	-19%
PE (kg PO ₄ eq.)	5,68x10 ⁻¹	4,21x10 ⁻¹	-1,47x10 ⁻¹	-26%
DAF (kg Sb eq.)	3,31x10 ⁻²	1,53x10 ⁻²	-1,78x10 ⁻²	-54%
UA (kg)	2,34x10 ⁶	2,30x10 ⁶	-4,00x10 ⁵	-2%
UE (MJ)	2,09x10 ⁴	1,69x10 ⁴	-4,00x10 ³	-19%

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia.

Observando a Tabela 14 podemos deduzir que tanto o uso de água e de energia quanto os potenciais impactos sofreram reduções menores em números absolutos que no Cenário (2) com LCD, excetuando a categoria de potencial de eutrofização, devido a massa da unidade funcional com CRT que foi bastante reduzida. No que tange aos impactos ambientais os valores seguiram a seguinte sequência crescente de redução: depleção abiótica, aquecimento global, eutrofização e acidificação. Nas categorias de impacto de aquecimento global e eutrofização as reduções foram menores no Cenário de Referência com monitor CRT do que no Cenário de Referência com monitor LCD, devido à influência do uso de água na geração energética. Nas categorias de acidificação e depleção abiótica esses percentuais de redução foram maiores no cenário com CRT devido ao não uso de recursos fósseis para a geração energética.

A redução observada na categoria de depleção abiótica (54%) foi obtida devido às reduções do peso mássico a ser extraído e a redução desse impacto na fase de distribuição que utiliza recursos fósseis para o transporte. Para a distribuição a redução resultante foi de 29% nessa categoria e o novo uso energético acrescentou 0,16% apenas.

Para o aquecimento global a redução obtida (29%), foi o resultado da redução de 57% e 68% nas fases de produção e de distribuição respectivamente, uma vez que a nova geração energética foi responsável pelo aumento em 8% nesse cenário. Seguindo ao

potencial de eutrofização suas parcelas de reduções ficaram com 54% para produção e 67% na distribuição, sendo a geração energética resultando em 8% no aumento dessa categoria, perfazendo o resultado final de 26% de redução geral do cenário. Finalmente para o potencial de acidificação reduzido em 19% foi o resultado da redução da fase de produção em 56%, da redução da fase de distribuição em 68% e do acréscimo de 9% na energia utilizada na reciclagem.

Para todos os impactos foram identificados como contribuintes com as maiores reduções na fase de produção, o tubo de raio catódico, alumínio, cobre e ciclohexano (solvente) e na distribuição o diesel continuou como maior redutor do que o querosene, o qual ainda foi considerado como pior agente de impacto.

No Cenário (2) a opção do monitor CRT obteve o percentual de reciclabilidade em termos mássicos em 69% e suas reduções em termos de média das categorias de impacto foram menores que o Cenário (2) LCD. Contudo, a adoção da reciclagem pode contribuir para significativas reduções de impactos que na opção com CRT, em média, foram reduzidos em 32% os impactos totais e na opção LCD reduziu-se 34%. Esses resultados condizem com a afirmação descrita por Duan *et al.* (2009), que sendo o tratamento de fim de vida gerenciado podem ser criados benefícios de até 50% de redução nos impactos ambientais, pois o uso de recursos secundários como reciclagem podem evitar a produção primária.

A reciclagem mostrou a redução dos recursos naturais e, principalmente, das cargas ambientais dos potenciais impactos de depleção abiótica, de eutrofização e de aquecimento global, o que são características aproximadas observadas em estudo realizado por Choi *et al.* (2006).

4.3 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para a análise de sensibilidade foi utilizado o método CML para a estimativa da influência e para assegurar a robustez relacionada aos impactos do Cenário de Referência da unidade funcional com utilização do monitor CRT. Com o processo de sensibilidade foram alterados o mix energético das fases de produção e uso e o transporte rodoviário na fase de distribuição, em semelhança à metodologia de análise descrita no estudo dos pesquisadores Bhakar *et al.* (2015).

Para esta análise de sensibilidade foram alteradas variáveis no Cenário de Referência com o computador e monitor CRT e no Cenário (2) com CRT a variável de

energia para a reciclagem, por terem obtido no geral os maiores índices quanto às categorias de potenciais impactos e consumos, analisados no estudo.

Para a análise do Cenário de Sensibilidade (1) foram caracterizadas três (3) situações, definidas como (S1, S2 e S3), comparadas ao Cenário de Referência CRT:

- (S1): Alteração do mix energético da China para o mix energético do Brasil no computador completo, na fase de produção, como forma de comparação entre os processos de produção energética;
- (S2): Alteração da distância rodoviária para o dobro da distância, na fase de distribuição, com a finalidade da verificação de uma cobertura maior abrangendo a completude do território nacional; e
- (S3): Substituição do processo de mix de produção energética brasileira pelo processo brasileiro de produção elétrica com biomassa na fase de uso para análise sensitiva com a mesma nação e insumo de geração alternado.

Para a análise do Cenário de Sensibilidade (2) foram caracterizadas três (3) situações, definidas como (S4, S5 e S6), comparadas ao Cenário de Referência CRT:

- (S4): Alteração do mix energético chinês para o processo de geração energética brasileira com biomassa na fase de produção para análise equiparativa das diferentes gerações nas nações específicas;
- (S5): Situação semelhante à situação (S2) com efeitos sobre a distância do transporte rodoviário na fase de distribuição; e
- (S6): Situação similar à situação (S3) com alteração da produção elétrica com biomassa brasileira na fase de uso do computador.

Para a análise do Cenário de Sensibilidade (3) foram caracterizadas duas (2) situações, definidas como (S7 e S8) e comparadas ao Cenário (2) com CRT:

- (S7): Alteração do percentual de uso energético com acréscimo em 30% do valor utilizado para reciclagem; e
- (S8): Alteração do percentual de uso energético com decréscimo em 30% do valor utilizado para reciclagem.

No Cenário de Sensibilidade (1), em sua primeira situação (S1) na qual houve a alteração do mix energético chinês para o mix energético brasileiro na fase de produção,

podemos notar que as reduções dos impactos seguem um intervalo de 7,2% a 19,8% e houve um acréscimo no uso de água. A utilização do processo de mix energético brasileiro com característica hidroelétrica foi o responsável pelo uso da água. Na situação (S2) com a alteração para o dobro da distância do transporte rodoviário na fase de distribuição coube alterações de aumento dos impactos de acidificação e eutrofização, e uso de energia, devido ao aumento de distância e conservação do combustível fóssil (diesel). Na terceira situação (S3), na fase de uso com o mix energético brasileiro alterado para geração energética brasileira com biomassa, foi obtida a redução nos impactos na categoria de aquecimento global que reduziu em 45,1%, porém nos outros impactos (acidificação, eutrofização e depleção) o aumento ficou evidente e na categoria de potencial eutrofização com 222%. O uso de água foi reduzido em torno de 46% e o uso de energia esteve praticamente estabilizado.

No Cenário de Sensibilidade (2) que contém as situações de alterações (S4, S5 e S6), a situação (S4) caracterizada pela alteração do mix energético chinês pelo processo de geração energética através da biomassa nos moldes brasileiros, na fase de produção, obteve-se valores de redução para a água e a energia, porém, houve o aumento da eutrofização, a inalteração da depleção abiótica e a redução nos impactos de aquecimento global e acidificação. O desempenho da situação (S5) resultou em alterações mínimas, pois, independente do efeito da situação anterior, essa conta com as mesmas características de (S2) que pertence à fase de distribuição com pouca influência nesse estudo. Para a sexta situação (S6) conservou-se as características de (S3) com a troca do processo de mix energético brasileiro pelo processo de geração energética também brasileira que nesse cenário os resultados obtidos são vistos nas reduções do impacto de aquecimento global e o uso de água. Já para os demais impactos (acidificação, eutrofização e depleção abiótica) seus valores foram acrescidos, com relevância a categoria de impacto de eutrofização que atingiu como aumento 276,8% quanto ao Cenário de Referência do computador com monitor CRT.

Com resultado da análise sobre os Cenários de Sensibilidade (1) e (2), temos que os maiores decréscimos foram obtidos pelo aquecimento global e o uso de água do Cenário de Sensibilidade (2) que utilizou a energia de biomassa nas fases de produção e fase de uso. Porém, nas categorias de acidificação e eutrofização abiótica, e no uso de energia esse cenário obteve os maiores acréscimos. Uma particularidade obtida em ambos os cenários foi a inalteração do impacto de eutrofização.

A Tabela 15 mostra os dados obtidos com resultados da análise de sensibilidade dos Cenários de Sensibilidade (1) e (2) comparados ao Cenário de Referência do computador com monitor CRT e os resultados no Cenário de Sensibilidade (3).

Para o Cenário de Sensibilidade (3) foram encontrados nas situações modeladas (S7 e S8) os acréscimos e decréscimos com o mesmo valor absoluto. Para o potencial de acidificação em 4%, para o potencial de aquecimento global e potencial de eutrofização o valor de 3% e para a categoria de depleção abiótica um valor nulo de alteração. Todas as alterações tiveram como resultado que a energia produzida e usada não influenciou consideravelmente os indicadores ambientais.

A análise de sensibilidade auferiu efeitos sobre os dados obtidos na ACV pelas alterações de variáveis e processos dentro de três Cenários de Sensibilidade. Essa análise de sensibilidade teve a consonância com o estudo dos pesquisadores Bhakar *et al.* (2015).

Tabela 15 – Resultados da Análise de Sensibilidade para os diferentes Cenários de Sensibilidade.

Impactos	CR	(S1)	% (S1/CR)	(S2)	% (S2/CR)	(S3)	% (S3/CR)
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,26x10 ³	1,01x10 ³	-19,8%	1,01x10 ³	-19,8%	6,92x10 ²	-45,1%
PA (kg SO ₂ eq.)	6,19x10 ⁰	5,45x10 ⁰	-12,0%	5,46x10 ⁰	-11,8%	7,48x10 ⁰	20,8%
PE (kg PO ₄ eq.)	5,68x10 ⁻¹	5,14x10 ⁻¹	-9,5%	5,20x10 ⁻¹	-8,5%	1,83x10 ⁰	222,2%
DAF (kg Sb eq.)	3,31x10 ⁻²	3,31x10 ⁻²	0,0%	3,31x10 ⁻²	0,0%	3,32x10 ⁻²	0,3%
UA (kg)	2,34x10 ⁶	2,59x10 ⁶	10,6%	2,59x10 ⁶	10,6%	1,26x10 ⁶	-46,1%
UE (MJ)	2,09x10 ⁴	1,94x10 ⁴	-7,2%	1,94x10 ⁴	-7,0%	2,09x10 ⁴	-0,3%
Impactos	CR	(S4)	% (S4/CR)	(S5)	% (S5/CR)	(S6)	% (S6/CR)
PAG (kg CO ₂ eq.)	1,26x10 ³	9,27x10 ²	-26,4%	9,33x10 ²	-26,0%	6,07x10 ²	-51,8%
PA (kg SO ₂ eq.)	6,19x10 ⁰	5,92x10 ⁰	-4,4%	5,93x10 ⁰	-4,2%	7,94x10 ⁰	28,3%
PE (kg PO ₄ eq.)	5,68x10 ⁻¹	8,25x10 ⁻¹	45,2%	8,31x10 ⁻¹	46,3%	2,14x10 ⁰	276,8%
DAF (kg Sb eq.)	3,31x10 ⁻²	3,31x10 ⁻²	0,0%	3,31x10 ⁻²	0,0%	3,32x10 ⁻²	0,3%
UA (kg)	2,34x10 ⁶	2,28x10 ⁶	-2,8%	2,28x10 ⁶	-2,8%	9,49x10 ⁵	-59,4%
UE (MJ)	2,09x10 ⁴	1,97x10 ⁴	-5,6%	1,98x10 ⁴	-5,5%	2,11x10 ⁴	1,1%
Impactos	C2	S7	% (S7/C2)	S8	%(S8/C2)		
PAG (kg CO ₂ eq.)	8,89x10 ²	9,19x10 ²	3%	8,60x10 ²	-3%		
PA (kg SO ₂ eq.)	5,03x10 ⁰	5,22x10 ⁰	4%	4,84x10 ⁰	-4%		
PE (kg PO ₄ eq.)	4,21x10 ⁻¹	4,35x10 ⁻¹	3%	4,07x10 ⁻¹	-3%		
DAF (kg Sb eq.)	1,53x10 ⁻²	1,53x10 ⁻²	0%	1,53x10 ⁻²	0%		
UA (kg)	2,30x10 ⁶	2,41x10 ⁶	5%	2,20x10 ⁶	-5%		
UE (MJ)	1,69x10 ⁴	1,76x10 ⁴	4%	1,63x10 ⁴	-4%		

PAG: Potencial de aquecimento global; PA: Potencial de acidificação; PE: Potencial de eutrofização; DAF: Depleção abiótica fóssil; UA: Uso de água; UE: Uso de energia; C2: Cenário (2) CRT; CR: Cenário de Referência CRT; S1: Situação (1); S2: Situação (2); S3: Situação (3); S4: Situação (4); S5: Situação (5); S6: Situação (6); S7: Situação (7); S8: Situação (8).

5 – CONCLUSÕES

Considerando o Cenário de Referência LCD e CRT conclui-se que as fases de produção e de uso resultaram nos maiores impactos e emissões, seguidas pela fase de distribuição que apresentou os menores impactos, porém, não na mesma magnitude, mesmo com distâncias de transporte continentais. Nesse cenário, dispositivos como o disco rígido, CD/DVD, fonte de alimentação, tubo de raio catódico, tela de cristal líquido e os elementos como o aço, alumínio e cobre, foram tidos como os maiores contribuintes para as categorias de impacto selecionadas. A água e a energia foram utilizadas em grandes volumes na fase de produção devido à necessidade para a produção dos combustíveis fósseis, para extração e processamento da matéria-prima (China) e a utilização de eletricidade na fase de uso (Brasil). Na fase de produção, as placas de circuito integrado (PCI) empregadas em todos os dispositivos obtiveram grande parcela dos impactos, pelos componentes menores (diodo, resistor, capacitor) requererem grande quantidade e variedade de insumos como chumbo, estanho e cobre. Como conclusão do Cenário de Referência os impactos do computador com monitor CRT foram os prejudiciais ao meio ambiente pelo peso mássico maior, necessitando de maior volume de extração de material na produção e pelo uso elétrico maior na fase de uso.

O Cenário (1) quando comparado ao Cenário de Referência com as opções de monitor CRT e LCD, revelou que o reuso nos moldes assumidos promoveram o acréscimo no gasto de eletricidade num fator de 50% relacionado ao uso normal. Contudo, todas as categorias de impactos nas quais tiveram seus valores acrescidos pela extensão do tempo de vida em 50%, obtiveram um aumento percentual menor do que o percentual de extensão desse tempo, por se tratar de uma única fase em um ciclo de vida completo. Com isso a categoria de depleção abiótica apresentou o menor dos percentuais nas duas opções de monitores, por não haver necessidade de extração de material. Quando assumido que a demanda extrativa foi estendida a um novo tempo de vida, os impactos sofreram reduções entre o intervalo de 9% a 33%. Como conclusão obtida no Cenário (1) a opção com monitor CRT resultou em menores reduções, ou seja, é o mais prejudicial devido ao uso elétrico.

No Cenário (2) com CRT e LCD, as influências foram diretamente relacionadas às fases de produção e de distribuição. O peso mássico extraído em menor quantidade, após o processo de reciclagem, reduziu o consumo de insumos e emissões, o que levou a mitigação considerável dos impactos, demonstrando que tanto o peso mássico e o uso

energético são variáveis a serem consideradas no processo de reciclagem. No referido cenário, o querosene, devido às maiores emissões dos elementos nocivos ao ambiente ficou resultante como mais prejudicial que o diesel. Como conclusão geral do Cenário (2) a opção com monitor CRT mostrou-se com o maior potencial de reciclabilidade mássico e energético tornando assim menos prejudicial em termos de impactos ambientais e de utilização de energia e principalmente uso de água que obteve redução ao contrário da unidade funcional com LCD que necessitou mais água para geração energética da reciclagem.

Concluiu-se que a fase de produção e a fase de uso no Cenário de Referência, Cenário (1) e Cenário (2) resultaram como os maiores contribuintes para as cargas ambientais durante todo o ciclo de vida dos eletroeletrônicos.

Concluiu-se que a reciclagem e suas tecnologias de recuperação afetam a carga de impacto, bem como a tecnologia empregada no dispositivo a ser reusado, principalmente no quesito de uso energético durante o ciclo de vida.

As ações mitigatórias de reuso e reciclagem são desejáveis nos computadores com os dois tipos de monitores, pois efetivamente podem mitigar impactos.

6 – RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS

Esse trabalho gerou um vasto conjunto de dados que podem ser utilizados para comparações, decisões e conhecimento acerca dos impactos ambientais relacionados aos equipamentos eletroeletrônicos.

Recomenda-se para trabalhos seguintes a obtenção de dados em fontes primárias para validação e consistência; a extensão das fronteiras do sistema como a avaliação das embalagens, mouse, teclado e também outro tipo de monitor.

Em relação ao desenvolvimento dos equipamentos as recomendações podem ser: a produção de equipamentos com características de miniaturização das peças, principalmente relacionados às placas de circuito impresso; a adoção efetiva de substâncias atóxicas; a modularização padronizada de partes periféricas; o avanço tecnológico nos processos de reciclagem; o tratamento e reutilização das águas; adoção de fontes renováveis e limpas de produção energética e a subtração do peso mássico dos computadores e monitores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINEE, 2017. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. (2017) Relatório de Desempenho Setorial. [Online] <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>>.
- ABINEE, 2017. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. [Online] < <http://www.abinee.org.br/programas/50anos/public/panorama/files/assets/common/downloads/panorama2017port.pdf>>.
- AL RAZI, K. M. H. Resourceful recycling process of waste desktop computers: A review study. (2016) *Resource, Conservation and Recycling*. v. 110, pp. 30-47.
- ANDRAE, A. S. G.; ANDERSEN, O., 2010. Life cycle assessments of consumer electronics - are they consistent?. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v.15, pp. 827-836.
- ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; KARAMANOVA, E.; LANCELLOTTI, I.; PELINO, M. 2008. Recycling of CRT panel glass as fluxing agent in the porcelain stoneware tile production. *Ceram. Int.* v. 34, pp. 1289–1295.
- ARAÚJO, M. G., 2013. Modelo de avaliação de ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil. Tese de doutorado. UFRJ/COPPE – Rio de Janeiro, 217 p.
- ARAÚJO, M. G.; MAGRINI, A.; MAHLER, C. F.; BILITEWSKI, B., 2012. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management*, v. 32, pp. 335-342.
- BABBITT, C. W.; KAHHAT, R.; WILLIAMS, E.; BABBITT, G. A., 2009. Evolution of product lifespan and implications for environmental assessment and management: A case study of personal computers in higher education, v. 43, pp. 5106-5112.
- BEIGBEDER, J.; PERRIN, D.; MASCARO, J.-F.; CUESTA, J.-M. L., 2013. Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 78, pp. 105-114.
- BHAKAR, V.; AGUR, A.; DIGALWAR, A. K.; SANGWAN, K. S., 2015. Life Cycle Assessment of CRT, LCD and LED Monitors. *Procedia CIRP*, v. 29, pp. 432-437.
- BIGUM, M.; BROGAARD, L.; CHRISTENSEN, T. H., 2012. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 207-208, p. 8-14.

- BOVEA, M. D.; GALLARDO, A., 2006. The influence of impact assessment methods on material selection for eco-design. *Material and Design*, v. 27, pp. 209-215.
- BRASIL – Governo do Brasil, 2012. Entidades que atuarão em programa de inclusão digital são selecionadas.[Online] <http://www.brasil.gov.br/governo/2012/11/entidades-que-atuarao-em-programa-de-inclusao-digital-sao-selecionadas>.
- BRASIL – Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>.
- BRASIL – Ministério de Minas e Energia – MME, (2017). Balanço Energético Nacional. [Online] <www.mme.gov.br>.
- BRITO, M. A. C., 2008. O uso dos computadores nos laboratórios de informática educativa na rede estadual de Goiânia: Limites e possibilidades do ambiente Cyber. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Goiás-Goiânia. [On line] <http://tede2.pucgoias.edu.br:8080/bitstream/tede/1206/1/MARIA%20APARECIDA%20CANDINE%20DE%20BRITO.pdf>.
- CALDEIRA-PIRES, A. A.; SOUZA-PAULA, M.C.; VILLAS BÔAS, R.C., 2005. A avaliação do ciclo de vida: a ISSO 14040 na América Latina. Brasília: Abipti, 337 pp.
- CAPRON, H. L.; JOHNSON, H. A., 2009. Introdução à informática. Pearson Prentice Hall, ed. 8, São Paulo.
- CHANCEREL, P.; MARWEDE, M.; NISSEN, N. F.; LANG, K.(2014). Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 98, pp. 9-18.
- CHANCEREL, P.; ROTTER, S., 2009. Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, v. 29, pp. 2336-2352.
- CHATTERJEE, S., 2012. Sustainable electronic waste management and recycling process. *American Journal of Environmental Engineering*, v. 2, pp. 23-33.
- CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T., 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, pp. 153-162.
- CHOI, B.; SHIN, H.; LEE, S.; HUR, T., 2006. Life cycle assessment of a personal computer and its effective recycling rate. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.11 pp. 122–128.
- CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E., 2013. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17 pp. 77-85.

- CORTI C. W., 2010. Sustainable Recycling of Electronic Scrap. London Bullion Market Association. LBMA Annual Conference, pp. 10-11. [Online]. <<http://www.lbma.org.uk/assets/Alch59Corti.pdf>>.
- COLTRO, L., 2007. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. CETEA/ITAL, Campinas-São Paulo [on-line].
- CURRAN, M. A. 2006. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. EPA – Environmental Protection Agency: Cincinnati, EUA. 88 p.
- DODBIBA, G.; NAGAI, H; WANG, L.; OKAYA, K.; FUJITA, T., 2012. Leaching of indium from obsolete liquid crystal displays: Comparing grinding with electrical disintegration in context of LCA. Waste Management, v. 32, pp. 1937-1944.
- DONKE, A. C., 2016. Avaliação do Desempenho Ambiental e Energético da Produção de Etanol de cana, milho e sorgo em uma Unidade Integrada, segundo a abordagem do Ciclo de Vida. Universidade de São Paulo. São Paulo. [On line] <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-13072016-092027/pt-r.php>.
- DONNELLY, K.; BECHETT-FURNELL, Z.; TRAEGER, S.; OKRASINSKI, T.; HOLMAN, S., 2006. Eco-design implemented through a product-based environmental management system. Journal of Cleaner Production, v. 14, pp. 1357-1367.
- DUAN, H; EUGSTER, M; HISCHIER, R; STREICHER-PORTE, M; LI, J., 2009. Life cycle assessment study of a Chinese desktop personal computer. Science of the Total Environment, v. 407, pp. 1755-1764.
- DWIVEDY, M.; MITTAL, R., 2010. Future trends in computer waste generation in Índia. Waste Management, v. 30, pp. 2265-2277.
- ECOINVENT. Base de Dados V. 3.4 (2017). [Online] < <https://www.ecoinvent.org/login-databases.html>>. Ecoinvent- 2018
- ELDUQUE, D.; JAVIERRE, C.; PINA, C.; MARTINEZ, E.; JIMENEZ, E., 2014. Life cycle assessment a domestic induction hob: electronic boards. Journal of Cleaner Production, v. 76, pp. 74-84.
- EPE – Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro, (2017). [Online] <[https://ben.epe.gov.br/ downloads/SíntesedoRelatórioFinal_2017_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/SíntesedoRelatórioFinal_2017_Web.pdf)>
- EUROPEAN UNION (EU)., 2009. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. European Union Commission.

<<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-ES-PT/TXT/?uri=CELEX:32009L0125&from=EN>>

- EYGEN, E. V.; MEESTER, S. D.; TRANA, H. P.; DEWULF, J., 2016. Resources savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, pp. 53-64.
- FITZPATRICK, C.; HICKEY, S.; SCHISCHKE, K.; MAHER, P., 2014. Sustainable life cycle engineering of a integrated desktop PC; a small to medium enterprise perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 74, pp. 155-160.
- GABI. Part 1 | LCA and introduction to GaBi. Thinkstep GaBi. <http://www.gabi-software.com/international/support/gabi-learning-center/gabi-6-learning-center/part-1-lca-and-introduction-to-gabi/>.
- GABI. Part 2 | LCA and introduction to GaBi. Thinkstep GaBi. <<http://www.gabi-software.com/international/support/gabi-learning-center/gabi-6-learning-center/part-2-scenario-modelling/>>.
- GU, Y.; WU, Y.; XU, M.; MU, X.; ZUO, T., 2016. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 127, pp. 331-338.
- GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. (2002). *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002.
- GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, H.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R., 2011. *Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future*. *Environmental Science and Technology*, v. 45, pp. 90-96.
- HISCHIER, R.; ACHACHLOUEI, M. A.; HILTY, L. M., 2014. Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results. *Environmental Modelling & Software*, v. 56, pp. 27-36.
- HIKWAMA, B. P., 2005. *Life Cycle Assessment of a personal computer*. Research thesis. University of Southern Queensland, Australia, apud TEEHAN, P.; KANDLIKAR, M. Sources of Variation in Life Cycle Assessments of Desktop Computers. *Journal of Industrial Ecology* 16 (81), 182-193, 2012.

- IANNICELLI-ZUBIANI, E. M.; GIANI, M. I.; RECANATI, F.; DOTELLI, G.; PURICELLI, S.; CRISTIANI, C., 2017. Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, pp. 1204-1216.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 2017. *World Energy Outlook 2017: China*. Paris-França. [Online] <<https://www.iea.org/weo/china/>>.
- INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010. *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. União Européia: Joint Research Centre (JRC).
- ISO 14040, (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. S.1.: International Organization for Standardization.
- ISO 14043, (2000). *Environmental management – Life cycle assessment – Life Cycle Interpretation*. International Organization for Standardization.
- ISO 14044, (2006). *Environmental management life cycle assessment Requirements and Guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO 14046, (2014). *Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines*.
- JEONG, I.-T.; LEE, K.-M., 2009. Assessment of the ecodesign improvement options using the global warming and economic performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, pp. 1-8.
- JESWIET, J.; HAUSCHILD, M., 2005. *EcoDesign and future environmental impacts.. Material and Design*, v. 26, pp. 629-634.
- JÖNBRINK K. A.; ZACKRISSON M. (2007). *Personal Computers (desktops and Laptops) and computer monitors. Draft Final Report (Task 1-7)*. [Online] <<http://extra.ivf.se/ecocomputer/downloads/EuP%20Lot%203%20Task%201-7,%20draft%20report.pdf>>.
- KARLSSON, R.; LUTTROPP, C. (2006). *EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue*. *Journal of Cleaner Production*. v. 14, pp. 1291 – 1298.
- KLÖEPFFER, W. (2008). *Life Cycle Sustainability Assessment of Products*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, pp. 89-95.
- KOEHLER, A. (2008). *Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources*. *International Journal Life Cycle Assessment*. V. 13, pp. 451–455.

- LEÃO, R. M., 2016. Análise ambiental e técnica para a obtenção de nanocristais de celulose de bagaço da cana-de-açúcar aplicados em nanocompósitos. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas - Universidade de Brasília, Brasília, 176p.
- LEIGH, N. G.; REALFF, M. J.; AI, N.; FRENCH, S. P.; ROSS, C. L.; BRAS, B., 2007. Modeling obsolete computer stock under regional data constraints: an Atlanta case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51 pp. 847-869.
- LOFTHOUSE, V., 2006. Ecodesign tool for designers: defining the requirements. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, pp. 1386-1395.
- LU, L.-T.; WERNICK, I. K.; HSIAO, T.-Y.; YU, Y.-H.; YANG, Y.-M.; MA, H.-W., 2006. Balancing the life cycle impacts of notebook computers: Taiwan's experience. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 48, p. 13-25.
- LUZ, S. M.; CALDEIRA-PIRES, A.; FERRÃO, P. M.C., 2010. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, pp. 1135-1144.
- LUTTROP, C.; LAGERSTEDT, J., 2006. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, pp. 1396-1408.
- MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R., 2016. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production*, v. 26(1), pp. 160-175. <<https://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>>
- MICHAELIS, L., 2003. The role of business in sustainable consumption. *Journal of Cleaner Production*, v. 11, pp. 915-921.
- MPOG – Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Projeto Computadores para Inclusão - Agosto 2009. Disponível em: <http://www.computadoresparainclusao.gov.br/media/anexos/Projeto_CI-Ago-2009_1.pdf> Acesso em: 2 nov. 2010.
- NOON, M. S.; LEE, S. J.; COOPER J.S., 2011. A life cycle assessment of end-of-life computer monitor management in the Seattle metropolitan region. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 57, pp. 22-29.
- NOVAES, M. PORTELLA., 2012. Indicadores de desempenho para a cadeia reversa do reuso de computadores pós-consumo: estudo de caso do Projeto Computadores para

- Inclusão. Dissertação(mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012. [Online] < <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9196>>
- OLIVEIRA M. M. W., 2010. Movimentos Transfronteiriços e Disposição de Resíduos de equipamentos Eletroeletrônicos. [Online] < https://issuu.com/recicloambiental/docs/marcus_oliveira_fgv_e-waste>
- PE International, 2013. [Online] Available at: <http://www.gabi-software.com/brazil/index/>
- PEETERS, J. R.; VANEGAS, P.; DEWULF, W.; DUFLOU, J. R., 2017. Economic and environmental evaluation of design for active disassembly. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, pp. 1182-1193.
- PEETERS, J. R.; VANEGAS, P.; TANGE, L.; VAN, H.; DUFLOU, J.R., 2014. Closed loop recycling of plastics containing Flame Retardants. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 84, pp. 35-43.
- PÉREZ-BELIS, V., BOVEA, M. D. & GÓMEZ, A., 2013. Waste electric and electronic toys: Management practices and characterisation. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 77, pp. 1-12.
- PIGOSSO, D. C. A.; ROZENFELD, H., 2011. Métodos e ferramentas de Ecodesign: revisão bibliográfica sistemática. 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGDP 2011. Porto Alegre, RS – Brasil.
- PIGOSSO, D. C. A.; ROSENFELD H.; MCALOONE, T. C., 2013. Ecodesign maturity model: A management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, pp. 160-173.
- PLATCHECK, E. R., 2012. Design industrial: metodologia de ecodesign para o desenvolvimento de produtos sustentáveis. Atlas – São Paulo, 127 p.
- PUCA, A.; CARRANO, M.; LIU, G.; MUSELLA, D.; RIPA, M.; VIGLIA, S.; ULGIATI, S., 2017. Energy and eMergy assessment of the production and operation of a personal computer. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 116, pp. 124-136.
- RAMESH-BABU, B.; PARANDE, A. K.; AHMED-BASHA, C., 2007. Electrical and electronic waste: a global environmental problem. *Waste Management and Research*, v.25 pp. 307-318.
- RAZI, K. M. H. A., 2016. Resourceful recycling process of waste desktop computers: A review study. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 110, pp. 30-47.
- ROBINSON, B. H., 2009. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, v. 408, pp. 183-191.

- SÁNCHEZ, L. E., 2011. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. Oficina de textos, São Paulo. 495 pp.
- SINGH, N.; LI, J.; ZENG, X., 2016. Global responses for recycling waste CRTs in e-waste. *Waste Management*, v. 57, pp. 187-197.
- SOCOLOF, M. L.; OVERLY, J. G.; GEIBIG, J. R., 2005. Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays. *Journal of Cleaner Production*, v. 13, pp. 1281-1294.
- SOCOLOF, M. L.; OVERLY, J. G.; GEIBIG, J. R., 2001. Desktop computer displays: A life cycle assessment. Center for Clean Products and Clean Technologies – University of Tennessee, v.1, pp. 1-995.
- SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J.; YUAN, W., 2013. Life cycle assessment of desktop PCs in Macau. *Journal Life Cycle Assessment*, v. 18, pp. 553-566.
- STALLINGS, W., 2010. Arquitetura e organização de computadores. Pearson Prentice Hall, ed. 8, São Paulo.
- TANSKANEN, P.; TAKALA, R., 2005. A decomposition of the end of life process. *Journal of Cleaner Production*, v.14, pp. 1326-1332.
- TEEHAN, P.; KANDLIKAR, M., 2012. Sources of Variation in Life Cycle Assessments of Desktop Computers. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, pp. 182-194.
- TSYDENOVA, O.; BENGTSSON, M., 2011. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, v. 31, pp. 45-58.
- UNEP – United Nations Environment Programme. (2009). Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies (RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES< https://www.researchgate.net/publication/278849195_Recycling_-_from_e-waste_to_resources>
- VEIT M. H. 2005. Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Tese de Doutorado. UFRGS. [Online] <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6530>>.
- VEZZOLI, C.; SCIAMA, D., 2006. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, pp. 1319-1325.
- VILELA, F. S. V., 2013. Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar : estudo de caso : Usina Jalles Machado S/A. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Universidade de Brasília, Brasília, 93 p.

- WATKINS, R.; TASSOU, S. A., 2006. Life cycle analysis of the environmental impact of different cabinet designs. In 13th World Congress of Food Science & Technology. University of Kent - UK <<http://dx.doi.org/10.1051/IUFoST:20060701>>.
- WHITE, C. D.; MASANET, E.; ROSEN, C. M.; BECKMAN, S. L., 2003. Product recovery with some byte: an overview of management challenges and environmental consequences in reverse manufacturing for the computer industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 11, pp. 445-458.
- WILLIAMS D. E., 2003. Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle, 2003. [On line] <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1208072&userType=inst>>
- WILLIAMS, D. E., 2004(1). Energy intensity of computer manufacturing: Hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environmental Science and Technology*, v. 38, pp. 6166-6174.
- WILLIAMS, D. E., 2004(2). Revisiting energy used to manufacture a desktop computer: hybrid analysis combining process and economic input-output methods. *Symposium on Electronics and Environment IEEE*, 2004. [Online] <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1299692/>>.
- XU, Q.; YU, M.; KENDALL, A.; HE, W.; LI, G.; SCHOENUNG, J. M., 2013. Environmental and economic evaluation of cathode ray tube (CRT) funnel glass waste management options in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, v.78, pp. 92-104.
- YU, J.; WILLIAMS, E.; JU, M.; YANG, Y., 2010. Forecasting global generation of obsolete personal computers. *Environmental Science and Technology*, v. 44, pp. 3232-3237.
- ZWOLINSKI, P.; LOPEZ-ONTIVEROS, M.-A.; BRISSAUD, D., 2006. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, pp. 1333-1345.

APÊNDICE A: INVENTÁRIO COMPLETO DO GABINETE

Obs.: O uso dos inventários está restrito ao público acadêmico. Não é aceito o uso em projetos financiados externamente à Universidade de Brasília – UnB com finalidades comerciais.

Gabinete desktop

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$8,20 \times 10^0$
ABS (Copolímero)	kg	$1,61 \times 10^{-1}$
Aço	kg	$1,05 \times 10^1$
Água	kg	$1,36 \times 10^3$
Alumínio fundido	kg	$6,62 \times 10^{-1}$
Circuito integrado - Tipo memória	kg	$2,69 \times 10^{-2}$
Cobre	kg	$1,05 \times 10^{-1}$
Disco rígido	kg	$5,50 \times 10^{-1}$
Fonte de alimentação	kg	$1,62 \times 10^0$
Placa de circuito impresso	kg	$3,63 \times 10^{-1}$
Placa mãe	kg	$2,70 \times 10^{-1}$
Polietileno granulado	kg	$2,10 \times 10^{-2}$
Polipropileno granulado	kg	$2,05 \times 10^{-1}$
Tomada Entrada e Saída	pç	$1,00 \times 10^0$
Unidade CD-ROM / DVD-ROM	kg	$7,50 \times 10^{-1}$
Saídas		
Gabinete desktop	kg	$9,47 \times 10^0$
Água	kg	$1,27 \times 10^3$
Água de resfriamento	kg	$8,28 \times 10^1$
Resíduos de polipropileno	kg	$1,30 \times 10^{-1}$
Resíduos não especificados	kg	$5,65 \times 10^0$

Auxiliares e energia - Diodo

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,39 \times 10^3$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$9,90 \times 10^{-2}$
Ácido nítrico, solução em 50%	kg	$2,80 \times 10^{-1}$
Ácido sulfúrico	kg	$6,00 \times 10^{-1}$
Água	kg	$5,39 \times 10^2$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$6,20 \times 10^{-1}$
Hidrogênio líquido	kg	$9,00 \times 10^{-2}$
Metanol *	kg	$5,50 \times 10^{-1}$
Nitrogênio líquido	kg	$9,26 \times 10^1$
Oxigênio líquido	kg	$7,50 \times 10^{-1}$
Peróxido de hidrogênio, solução em 50%	kg	$2,20 \times 10^{-1}$
Químicos orgânicos	kg	$8,71 \times 10^{-1}$
Xileno	kg	$2,96 \times 10^{-1}$
Saídas		
Auxiliares e Energia - Diodo	kg	$1,00 \times 10^0$

Acetona	kg	$7,30 \times 10^{-2}$
Água	kg	$2,20 \times 10^2$
Água de resfriamento	kg	$3,29 \times 10^1$
Água residual	kg	$2,86 \times 10^2$
Amônia	kg	$1,10 \times 10^{-2}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$1,33 \times 10^{-3}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$1,33 \times 10^{-3}$
Cloreto	kg	$3,90 \times 10^{-3}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$3,60 \times 10^{-3}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$4,00 \times 10^{-2}$
Dióxido sulfúrico	kg	$2,50 \times 10^{-2}$
Estanho	kg	$5,00 \times 10^{-5}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,50 \times 10^{-2}$
Fluoretos	kg	$1,20 \times 10^{-2}$
Fosfato	kg	$3,00 \times 10^{-3}$
Monóxido de carbono	kg	$4,20 \times 10^{-2}$
Nitrito	kg	$6,40 \times 10^{-2}$
Óxidos de nitrogênio	kg	$7,30 \times 10^{-2}$
Resíduos não especificados	kg	$9,49 \times 10^1$
Sólidos suspensos	kg	$1,10 \times 10^{-1}$
Sulfato	kg	$1,30 \times 10^{-2}$
Xileno	kg	$1,01 \times 10^{-1}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Auxiliares e energia - Resistor		
Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,48 \times 10^2$
Água	kg	$4,10 \times 10^1$
Carboximetilcelulose *	kg	$3,20 \times 10^{-3}$
Químicos orgânicos	kg	$6,40 \times 10^{-3}$
Solvente, orgânico *	kg	$6,40 \times 10^{-3}$
Saídas		
Água	kg	$1,13 \times 10^1$
Água de resfriamento	kg	$8,19 \times 10^0$
Água residual	kg	$2,03 \times 10^1$
Auxiliares e energia - resistor	kg	$1,00 \times 10^0$
Etil celulose	kg	$3,20 \times 10^{-3}$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$9,60 \times 10^{-3}$
Resíduos não especificados	kg	$1,15 \times 10^{-1}$
Resíduos plásticos	kg	$1,15 \times 10^{-1}$
Solventes	kg	$3,20 \times 10^{-3}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Auxiliares e energia - Transistor

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$7,20 \times 10^0$
Água	kg	$7,30 \times 10^0$
Nitrogênio líquido	kg	$8,30 \times 10^0$
Químicos, orgânicos	kg	$3,80 \times 10^{-1}$
Saídas		
Água	kg	$5,38 \times 10^{-1}$
Água de resfriamento	kg	$9,22 \times 10^{-1}$
Água residual	kg	$5,84 \times 10^0$
Auxiliares e energia - Transistor	kg	$1,00 \times 10^0$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$3,80 \times 10^{-1}$
Estanho, resíduos	kg	$6,90 \times 10^{-1}$
Resíduos não especificados	kg	$4,18 \times 10^0$
Resíduos plásticos	kg	$2,42 \times 10^0$
Silício	kg	$1,00 \times 10^{-2}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Capacitor

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$2,01 \times 10^2$
Acetato de etilo *	kg	$3,96 \times 10^{-1}$
Acetona	kg	$9,90 \times 10^{-2}$
Água	kg	$2,80 \times 10^2$
Barite *	kg	$7,91 \times 10^{-1}$
Cobre	kg	$1,41 \times 10^{-2}$
Dióxido de titânio *	kg	$4,07 \times 10^{-1}$
Estanho *	kg	$2,44 \times 10^{-2}$
Metiletilcetona *	kg	$3,96 \times 10^{-1}$
Níquel (99.95%) *	kg	$2,01 \times 10^{-1}$
Paládio *	kg	$1,33 \times 10^{-3}$
Prata *	kg	$3,92 \times 10^{-2}$
Químicos orgânicos	kg	$9,90 \times 10^{-2}$
Vidro plano, não revestido	kg	$2,20 \times 10^{-3}$
Saídas		
Capacitor	kg	$1,00 \times 10^0$
Água	kg	$7,05 \times 10^1$
Água de resfriamento	kg	$5,95 \times 10^1$
Água residual	kg	$1,50 \times 10^2$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos - NMVOC	kg	$3,40 \times 10^{-2}$
Resíduos não especificados	kg	$4,80 \times 10^{-1}$

Solvente	kg	$6,50 \times 10^{-1}$
----------	----	-----------------------

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Circuito integrado lógico

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$5,17 \times 10^2$
Chumbo	kg	$3,70 \times 10^{-2}$
Cobre	kg	$8,20 \times 10^{-2}$
Estanho *	kg	$6,30 \times 10^{-2}$
Fibra de vidro - poliamida *	kg	$3,17 \times 10^{-1}$
Níquel (99.95%) *	kg	$3,28 \times 10^{-3}$
Ouro *	kg	$1,08 \times 10^{-2}$
Prata *	kg	$7,50 \times 10^{-3}$
Químicos orgânicos	kg	$8,60 \times 10^{-3}$
Resina epóxi	kg	$4,39 \times 10^{-1}$
Zinco *	kg	$7,56 \times 10^{-3}$
Saídas		
Circuito integrado lógico	kg	$1,00 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Circuito integrado memória

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$2,90 \times 10^3$
Aço	kg	$7,70 \times 10^{-3}$
Chumbo	kg	$7,80 \times 10^{-4}$
Cobre	kg	$3,43 \times 10^{-1}$
Estanho *	kg	$4,42 \times 10^{-3}$
Fósforo, branco *	kg	$3,21 \times 10^{-4}$
Ouro *	kg	$1,00 \times 10^{-3}$
Prata *	kg	$2,10 \times 10^{-3}$
Químicos orgânicos	kg	$6,60 \times 10^{-3}$
Resina epóxi	kg	$6,50 \times 10^{-1}$
Zinco *	kg	$1,09 \times 10^{-2}$
Saídas		
Circuito integrado - Memória	kg	$1,00 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

CD / DVD ROM

Produtos	Unidade	Quantidade
----------	---------	------------

Entradas			
Eletricidade - Mix	MJ		$6,12 \times 10^0$
ABS (Copolímero)	kg		$6,20 \times 10^{-2}$
Aço	kg		$1,06 \times 10^0$
Cobre	kg		$7,02 \times 10^{-2}$
Placa de circuito impresso	kg		$8,80 \times 10^{-2}$
Policarbonato	kg		$3,40 \times 10^{-2}$
Polietileno granulado	kg		$1,38 \times 10^{-1}$
Saídas			
Unidade de CD e DVD	kg		$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg		$4,50 \times 10^{-1}$

Conector Elétrico			
Produtos	Unidade		Quantidade
Entradas			
Aço	kg		$7,31 \times 10^{-1}$
Cobre	kg		$8,70 \times 10^{-2}$
Eletricidade - Mix	MJ		$2,34 \times 10^1$
Polietileno, granulado, alta densidade	kg		$1,83 \times 10^{-1}$
Saídas			
Conector Elétrico	kg		$1,00 \times 10^0$

Diodo			
Produtos	Unidade		Quantidade
Entradas			
Auxiliares e energia - diodo	kg		$1,00 \times 10^0$
Cobre	kg		$2,50 \times 10^{-1}$
Chumbo	kg		$8,22 \times 10^{-3}$
Estanho *	kg		$1,53 \times 10^{-2}$
Molibdênio *	kg		$1,61 \times 10^{-1}$
Óxido de alumínio *	kg		$3,19 \times 10^{-1}$
Resina epóxi	kg		$2,19 \times 10^{-2}$
Silício, mix eletrônico	kg		$4,78 \times 10^{-3}$
Vidro do funil - CRT	kg		$2,61 \times 10^{-1}$
Saídas			
Diodo	kg		$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg		$5,50 \times 10^{-1}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Diodo emissor de luz

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Auxiliares e energia - diodo	kg	$1,00 \times 10^0$
Cobre	kg	$2,35 \times 10^{-1}$
Chumbo	kg	$1,63 \times 10^{-2}$
Estanho *	kg	$4,65 \times 10^{-2}$
Ferro gusa *	kg	$4,51 \times 10^{-1}$
Molibdênio *	kg	$2,10 \times 10^{-2}$
Níquel (99.95%) *	kg	$3,85 \times 10^{-3}$
Resina epóxi	kg	$1,04 \times 10^{-4}$
Silício, mix eletrônico	kg	$4,68 \times 10^{-3}$
Vidro de funil - CRT	kg	$2,61 \times 10^{-1}$
Saídas		
Diodo emissor de luz	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg	$1,04 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Disco rígido

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$6,16 \times 10^0$
ABS (Copolímero)	kg	$1,00 \times 10^{-3}$
Aço	kg	$1,60 \times 10^{-1}$
Alumínio	kg	$4,52 \times 10^{-1}$
Alumínio - extrusão	kg	$4,44 \times 10^{-1}$
Placa de circuito impresso	kg	$3,20 \times 10^{-1}$
Saídas		
Disco rígido	kg	$5,75 \times 10^{-1}$
Resíduos não especificados	kg	$8,05 \times 10^{-1}$

Fonte de alimentação

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Aço	kg	$1,14 \times 10^0$
Cabo de fita, 20 pinos	kg	$1,94 \times 10^{-1}$
Placa de circuito impresso	kg	$6,04 \times 10^{-1}$
Tomada Entrada e Saída - Cabo	pcs	$1,00 \times 10^0$
Ventilador - fan	kg	$7,42 \times 10^{-2}$
Saídas		
Fonte de alimentação	kg	$1,62 \times 10^0$
Resíduos sólidos	kg	$3,90 \times 10^{-1}$

Placa de circuito impresso

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Capacitor	kg	$3,27 \times 10^{-2}$
Circuito integrado lógico	kg	$1,73 \times 10^{-1}$
Conector elétrico, interconexão de periférico	kg	$1,94 \times 10^{-2}$
Diodo	kg	$4,08 \times 10^{-3}$
Diodo emissor de luz	kg	$1,02 \times 10^{-3}$
Montagem de placa de circuito impresso	m ²	$2,32 \times 10^{-1}$
Resistor	kg	$2,35 \times 10^{-2}$
Solda e montagem	m ²	$2,32 \times 10^{-1}$
Transistor	kg	$1,02 \times 10^{-2}$
Saídas		
Placa de circuito impresso	kg	$1,00 \times 10^0$

Placa de circuito impresso - área

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,55 \times 10^3$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$1,36 \times 10^1$
Ácido sulfúrico *	kg	$1,17 \times 10^0$
Água	kg	$6,69 \times 10^3$
Chumbo	kg	$4,45 \times 10^{-3}$
Cloreto de ferro *	kg	$8,61 \times 10^{-1}$
Cloreto de sódio	kg	$5,11 \times 10^{-1}$
Cobre	kg	$4,69 \times 10^0$
Estanho *	kg	$7,58 \times 10^{-3}$
Hidróxido de sódio, solução em 50%	kg	$6,97 \times 10^0$
Peróxido de hidrogênio, solução em 50%	kg	$1,77 \times 10^0$
Propilenoglicol	kg	$5,01 \times 10^{-1}$
Resina Fenólica	kg	$2,13 \times 10^{-1}$
Saídas		
Placa de circuito impresso - área	m ²	$1,00 \times 10^0$
Ácido sulfúrico	kg	$2,46 \times 10^{-4}$
Água	kg	$6,29 \times 10^3$
Água de resfriamento	kg	$4,08 \times 10^2$
Arsênio	kg	$2,18 \times 10^{-6}$
Cádmio	kg	$1,84 \times 10^{-5}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$3,03 \times 10^{-2}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$3,03 \times 10^{-2}$
Chumbo	kg	$1,55 \times 10^{-3}$

Cloreto de hidrogênio	kg	$2,86 \times 10^{-3}$
Cobre	kg	$5,16 \times 10^{-3}$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$4,27 \times 10^{-2}$
Cromo	kg	$5,22 \times 10^{-5}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$8,17 \times 10^{-2}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$8,17 \times 10^{-2}$
Fluoretos	kg	$5,51 \times 10^{-5}$
Halogênio Orgânico Absorvível (AOX)	kg	$1,34 \times 10^{-4}$
Hidróxido de sódio	kg	$1,48 \times 10^{-3}$
Lodo	kg	$4,12 \times 10^0$
Mercúrio	kg	$6,09 \times 10^{-7}$
Níquel	kg	$6,09 \times 10^{-5}$
Partículas, <2,5 μm	kg	$3,37 \times 10^{-4}$
Partículas, > 2,5 μm e <10 μm	kg	$1,12 \times 10^{-4}$
Peróxido de hidrogênio	kg	$3,45 \times 10^{-4}$
Resíduos de tinta	kg	$1,82 \times 10^{-1}$
Resíduos perigosos	kg	$1,39 \times 10^1$
Resíduos sólidos	kg	$1,51 \times 10^1$
Zinco	kg	$5,14 \times 10^{-5}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Placa-mãe			
Produtos	Unidade	Quantidade	
Entradas			
Capacitor	kg	$2,40 \times 10^{-1}$	
Circuito integrado - lógico	kg	$8,16 \times 10^{-2}$	
Circuito integrado - memória	kg	$2,04 \times 10^{-2}$	
Conector elétrico	kg	$2,45 \times 10^{-1}$	
Diodo	kg	$1,71 \times 10^{-3}$	
Diodo emissor de luz	kg	$7,35 \times 10^{-4}$	
Placa de circuito impresso	m ²	$1,10 \times 10^{-1}$	
Resistor	kg	$1,10 \times 10^{-2}$	
Solda	m ²	$1,20 \times 10^{-1}$	
Transistor	kg	$4,57 \times 10^{-2}$	
Saídas			
Placa-mãe	kg	$1,00 \times 10^0$	

Químicos orgânicos

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Ácido acético	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Acetona	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Benzeno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Butadieno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Etileno, média	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Etil benzeno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Etileno glicol	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Óxido de etileno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Formaldeído	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Metanol *	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Fenol	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Propileno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Estireno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Tolueno, líquido	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Xileno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Cloreto de vinila *	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Dicloreto de etileno	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Acetato de vinila *	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Ureia *	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Éter metil-tert-butílico *	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Saídas		
Químicos Orgânicos	kg	$1,00 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Resistor			
Produtos	Unidade	Quantidade	
Entradas			
Areia de sílica	kg	$2,46 \times 10^{-1}$	
Auxiliares e energia - resistor	kg	$1,00 \times 10^0$	
Cal, empacotada	kg	$6,15 \times 10^{-4}$	
Chumbo	kg	$5,41 \times 10^{-3}$	
Cobre	kg	$4,55 \times 10^{-3}$	
Cromo *	kg	$1,11 \times 10^{-3}$	
Estanho *	kg	$1,44 \times 10^{-2}$	
Ferro gusa *	kg	$2,89 \times 10^{-2}$	
Níquel *	kg	$2,03 \times 10^{-2}$	
Ouro *	kg	$6,27 \times 10^{-3}$	
Óxido de alumínio *	kg	$8,60 \times 10^{-1}$	
Paládio *	kg	$1,72 \times 10^{-3}$	

Polimetilmetacrilato	kg	$7,87 \times 10^{-3}$
Prata *	kg	$1,23 \times 10^{-2}$
Resina epóxi	kg	$1,16 \times 10^{-2}$
Silício, mix eletrônico	kg	$1,23 \times 10^{-4}$
Tubo de vidro borossilicato	kg	$8,12 \times 10^{-3}$
Saídas		
Resistor	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg	$1,23 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Solda para PCI

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,21 \times 10^1$
Chumbo	kg	$2,98 \times 10^{-2}$
Estanho *	kg	$5,08 \times 10^{-2}$
Saídas		
Solda para PCI	m ²	$1,00 \times 10^0$
2-Propanol	kg	$3,45 \times 10^{-3}$
Ácido fórmico	kg	$3,75 \times 10^{-4}$
Formaldeído	kg	$3,45 \times 10^{-3}$
Monoetanolamina	kg	$2,25 \times 10^{-4}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Transistor

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Alumínio	kg	$1,22 \times 10^{-2}$
Auxiliares e energia - Transistor	kg	$1,00 \times 10^0$
Chumbo	kg	$2,56 \times 10^{-1}$
Cobre	kg	$2,11 \times 10^0$
Resina epóxi	kg	$2,85 \times 10^0$
Silício, mix eletrônico	kg	$2,96 \times 10^{-2}$
Níquel, 99,5% *	kg	$4,64 \times 10^{-2}$
Ferro gusa *	kg	$6,03 \times 10^{-2}$
Estanho *	kg	$4,41 \times 10^{-1}$
Saídas		
Transistor	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduo não especificado	kg	$5,81 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Tomada de entrada e saída

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$5,33 \times 10^{-3}$
Cobre	kg	$6,46 \times 10^{-3}$
Composto de policloreto de vinila	kg	$4,00 \times 10^{-2}$
Latão	kg	$2,02 \times 10^{-2}$
Polietileno, alta densidade, granulado	kg	$5,12 \times 10^{-3}$
Zinco	kg	$6,70 \times 10^{-3}$
Saídas		
Tomada Entrada e Saída	pcs	$1,00 \times 10^0$

Ventilador - fan

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Latão de fundição	kg	$1,62 \times 10^{-1}$
Placa de circuito impresso	kg	$1,56 \times 10^{-1}$
Polietileno granulado	kg	$7,63 \times 10^{-1}$
Saídas		
Ventilador - fan	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg	$8,07 \times 10^{-2}$

APÊNDICE B: INVENTÁRIO COMPLETO DO MONITOR CRT 17”

Obs.: O uso dos inventários está restrito ao público acadêmico. Não é aceito o uso em projetos financiados externamente à Universidade de Brasília – UnB com finalidades comerciais.

Monitor CRT 17" - Montagem

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$1,18 \times 10^1$
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	kg	$3,75 \times 10^{-1}$
Água	kg	$1,31 \times 10^0$
Alumínio fundido	kg	$6,67 \times 10^{-1}$
Cicloexano	kg	$1,66 \times 10^{-4}$
Cobre	kg	$1,03 \times 10^{-1}$
Isopropanol	kg	$1,71 \times 10^{-2}$
Aço	kg	$3,05 \times 10^0$
Placa de circuito impresso	kg	$9,74 \times 10^{-1}$
Poliuretano flexível (PU)	kg	$1,11 \times 10^{-2}$
Polivinilcloreto - injeção	kg	$2,97 \times 10^0$
Tomada Entrada e Saída	kg	$5,85 \times 10^{-2}$
Tubo de raio catódico	kg	$9,48 \times 10^0$
Saídas		
Monitor CRT 17"	kg	$1,48 \times 10^1$
Água	kg	$1,31 \times 10^0$
Resíduos de plástico	kg	$7,16 \times 10^{-2}$
Resíduos de vidro - quebra	kg	$3,38 \times 10^{-1}$
Resíduos não especificados	kg	$1,11 \times 10^0$

Canhão de elétrons

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Tubo de vidro borossilicato	kg	$2,00 \times 10^{-1}$
Polietileno granulado	kg	$1,00 \times 10^{-1}$
Aço	kg	$1,40 \times 10^0$
Saídas		
Canhão de elétrons	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduo não especificado	kg	$7,00 \times 10^{-1}$

Frita

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,06 \times 10^1$
Areia de sílica	kg	$2,00 \times 10^{-2}$
Barite*	kg	$2,00 \times 10^{-2}$
Bórax*	kg	$9,00 \times 10^{-2}$

Chumbo	kg	$4,12 \times 10^{-1}$
Concentrado de zinco	kg	$1,20 \times 10^{-1}$
Saídas		
Frita	kg	$1,00 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Tubo de raio catódico		
Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$2,27 \times 10^1$
Acetona líquida	kg	$2,96 \times 10^{-5}$
Ácido bórico *	kg	$4,42 \times 10^{-4}$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$4,10 \times 10^{-3}$
Ácido sulfúrico	kg	$1,15 \times 10^{-2}$
Aço	kg	$3,61 \times 10^{-1}$
Água	kg	$5,54 \times 10^1$
Amônia líquida	kg	$1,11 \times 10^{-5}$
Cal virgem, moído e solto	kg	$8,92 \times 10^{-3}$
Canhão de elétrons	kg	$9,44 \times 10^{-3}$
Carbonato de amônio *	kg	$4,47 \times 10^{-4}$
Carbano preto	kg	$1,93 \times 10^{-3}$
Cloreto de cálcio *	kg	$1,19 \times 10^{-2}$
Cloreto de Ferro*	kg	$1,28 \times 10^{-2}$
Composto orgânico de cloro	kg	$3,77 \times 10^{-3}$
Dispersão acrílica, solução em 65% *	kg	$8,53 \times 10^{-4}$
Frita	kg	$6,23 \times 10^{-3}$
Hidróxido de sódio, solução em 50%	kg	$5,42 \times 10^{-3}$
Hipocloreto de sódio *	kg	$8,64 \times 10^{-6}$
Mischmetal *	kg	$5,37 \times 10^{-4}$
Níquel, 99,5% *	kg	$9,17 \times 10^{-3}$
Nitrogênio líquido	kg	$4,27 \times 10^{-3}$
Oxigênio líquido	kg	$7,07 \times 10^{-4}$
Peróxido de hidrogênio, solução em 50%	kg	$4,99 \times 10^{-3}$
Químico inorgânico *	kg	$1,94 \times 10^{-3}$
Químico orgânico	kg	$1,13 \times 10^{-2}$
Tolueno	kg	$4,49 \times 10^{-4}$
Vidro do funil	kg	$2,51 \times 10^{-1}$
Vidro do painel	kg	$6,61 \times 10^{-1}$
Xileno	kg	$4,49 \times 10^{-5}$
Zinco	kg	$9,52 \times 10^{-4}$
Saídas		
Tubo de raio catódico	kg	$1,00 \times 10^0$

Água	kg	4,71 x 10 ¹
Água de resfriamento	kg	3,38 x 10 ⁰
Água residual	kg	4,92 x 10 ⁰
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	2,50 x 10 ⁻⁴
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	2,50 x 10 ⁻⁴
Chumbo	kg	2,81 x 10 ⁻⁷
Cianeto	kg	5,66 x 10 ⁻⁸
Cobre	kg	1,68 x 10 ⁻⁷
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	1,49 x 10 ⁻⁵
Cromo	kg	9,53 x 10 ⁻⁷
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	5,97 x 10 ⁻⁴
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	6,75 x 10 ⁻⁴
Dietilamina	kg	3,26 x 10 ⁻⁶
Dióxido sulfúrico	kg	9,31 x 10 ⁻⁴
Ferro	kg	1,54 x 10 ⁻⁵
Fluoretos	kg	3,22 x 10 ⁻⁴
Fosfato	kg	7,57 x 10 ⁻⁸
Fósforo	kg	4,72 x 10 ⁻⁶
Manganês	kg	3,36 x 10 ⁻⁷
Molibdênio	kg	1,12 x 10 ⁻⁸
Monóxido de carbono	kg	1,59 x 10 ⁻³
Níquel, 99,5%	kg	7,41 x 10 ⁻⁶
Nitrogênio	kg	6,71 x 10 ⁻⁴
Óleos não especificados	kg	2,25 x 10 ⁻⁵
Óxido de nitrogênio	kg	2,03 x 10 ⁻⁴
Resíduos não especificados	kg	3,80 x 10 ⁻¹
Sólidos suspensos	kg	4,33 x 10 ⁻⁴
Tolueno	kg	3,59 x 10 ⁻⁴
Xileno	kg	4,49 x 10 ⁻⁵
Zinco	kg	1,30 x 10 ⁻⁶

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Tubo de vidro borossilicato

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	4,07 x 10 ⁰
Ácido bórico *	kg	1,00 x 10 ⁻¹
Água	kg	5,43 x 10 ⁻¹
Areia de sílica	kg	7,03 x 10 ⁻¹
Carbonato de Cálcio	kg	1,58 x 10 ⁻¹
Óxido de alumínio *	kg	5,00 x 10 ⁻²

Saídas

Tubo de vidro - borossilicato	kg	$1,00 \times 10^0$
Água residual	kg	$5,43 \times 10^{-1}$
Dióxido de carbono	kg	$1,10 \times 10^{-2}$
Óxido de nitrogênio	kg	$6,52 \times 10^{-3}$
Partículas, <2,5 µm	kg	$1,50 \times 10^{-3}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Vidro do funil CRT

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,06 \times 10^1$
Água	kg	$3,60 \times 10^0$
Barite *	kg	$2,35 \times 10^{-2}$
Cal	kg	$3,50 \times 10^{-2}$
Carbonato de sódio	kg	$5,30 \times 10^{-2}$
Chumbo	kg	$7,70 \times 10^{-2}$
Dolomite *	kg	$1,80 \times 10^{-2}$
Feldspar *	kg	$3,50 \times 10^{-2}$
Nitrato de cálcio *	kg	$3,27 \times 10^{-2}$
Nitrato de potássio *	kg	$1,08 \times 10^{-1}$
Nitrogênio líquido	kg	$3,90 \times 10^{-3}$
Oxigênio líquido	kg	$1,90 \times 10^{-3}$
Químico orgânico	kg	$4,30 \times 10^{-4}$
Silício	kg	$3,27 \times 10^{-1}$
Solvente orgânico *	kg	$3,30 \times 10^{-4}$
Saídas		
Vidro do funil CRT	kg	$1,00 \times 10^0$
Água	kg	$3,38 \times 10^0$
Água de resfriamento	kg	$2,20 \times 10^{-1}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$3,98 \times 10^{-5}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$3,98 \times 10^{-5}$
Chumbo	kg	$1,54 \times 10^{-6}$
Cloreto de hidrogênio	kg	$9,24 \times 10^{-6}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$2,09 \times 10^{-5}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$1,07 \times 10^{-4}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,37 \times 10^{-6}$
Halogênio Orgânico Absorvível (AOX)	kg	$2,00 \times 10^{-7}$
Resíduo não especificado	kg	$1,55 \times 10^{-2}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Vidro do painel CRT

Produtos	Unidade	Quantidade
Eletricidade - mix	MJ	$8,92 \times 10^0$
Água	kg	$1,82 \times 10^0$
Amônia líquida	kg	$2,00 \times 10^{-3}$
Barite *	kg	$6,38 \times 10^{-2}$
Carbonato de cobre	kg	$6,50 \times 10^{-2}$
Carbonato de sódio	kg	$5,00 \times 10^{-2}$
Chumbo	kg	$7,70 \times 10^{-2}$
Cobalto *	kg	$8,33 \times 10^{-3}$
Dolomite *	kg	$1,17 \times 10^{-2}$
Feldspar *	kg	$5,85 \times 10^{-2}$
Níquel, 99,5% *	kg	$8,33 \times 10^{-3}$
Nitrato de cálcio *	kg	$3,47 \times 10^{-2}$
Nitrato de potássio *	kg	$7,14 \times 10^{-2}$
Nitrogênio	kg	$4,12 \times 10^{-3}$
Oxigênio líquido	kg	$2,01 \times 10^{-3}$
Químico orgânico	kg	$2,97 \times 10^{-3}$
Areia de sílica	kg	$2,71 \times 10^{-1}$
Solvente orgânico *	kg	$2,10 \times 10^{-4}$
Zinco	kg	$8,33 \times 10^{-3}$
Saídas		
Vidro do painel CRT	kg	$1,00 \times 10^0$
Água	kg	$1,45 \times 10^0$
Água de resfriamento	kg	$1,11 \times 10^{-1}$
Amônia	kg	$1,00 \times 10^{-4}$
Antimônio	kg	$3,30 \times 10^{-6}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$2,03 \times 10^{-5}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$2,03 \times 10^{-5}$
Cloreto de hidrogênio	kg	$2,60 \times 10^{-6}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$1,07 \times 10^{-5}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$5,47 \times 10^{-5}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,30 \times 10^{-6}$
Halogênio Orgânico Absorvível (AOX)	kg	$1,10 \times 10^{-7}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

APÊNDICE C: INVENTÁRIO COMPLETO DO MONITOR LCD 17”

Obs.: O uso dos inventários está restrito ao público acadêmico. Não é aceito o uso em projetos financiados externamente à Universidade de Brasília – UnB com finalidades comerciais.

Monitor LCD 17"

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Aço	kg	$7,00 \times 10^{-3}$
Acrilonitrila–butadieno–estireno (ABS)	kg	$2,47 \times 10^{-1}$
Alumínio	kg	$8,89 \times 10^{-1}$
Auxiliares e energia - Montagem cristal líquido	kg	$5,10 \times 10^0$
Auxiliares e energia - Montagem monitor	kg	$4,01 \times 10^0$
Borracha sintética	kg	$1,50 \times 10^{-2}$
Placa de circuito impresso	kg	$2,23 \times 10^{-1}$
Poliestireno granulado	kg	$6,75 \times 10^{-1}$
Saídas		
Monitor LCD 17"	kg	$6,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg	$5,16 \times 10^0$

Auxiliares e Energia - Montagem de Cristal Líquido

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$4,88 \times 10^1$
Acetona líquida	kg	$6,87 \times 10^{-4}$
Ácido acético*	kg	$4,27 \times 10^{-4}$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$2,87 \times 10^{-3}$
Ácido fosfórico*	kg	$2,63 \times 10^{-3}$
Ácido nítrico, solução em 50%	kg	$8,27 \times 10^{-4}$
Ácido sulfúrico	kg	$1,53 \times 10^{-2}$
Água	kg	$9,57 \times 10^1$
Amônia líquida	kg	$1,95 \times 10^{-3}$
Argônio líquido	kg	$5,25 \times 10^{-4}$
Cal hidratada	kg	$9,27 \times 10^{-3}$
Cicloexanol	kg	$1,35 \times 10^{-5}$
Cloro gasoso	kg	$1,03 \times 10^{-3}$
Dióxido de carbono	kg	$2,49 \times 10^{-6}$
Etanol, solução em 99,7%	kg	$9,00 \times 10^{-4}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$2,81 \times 10^{-4}$
Hidrogênio líquido	kg	$2,96 \times 10^{-2}$
Hidróxido de sódio*	kg	$2,39 \times 10^{-2}$
Isopropanol	kg	$2,33 \times 10^{-2}$
Krypton*	kg	$1,72 \times 10^{-6}$
Metiletilcetona*	kg	$4,90 \times 10^{-7}$
Nitrogênio líquido	kg	$3,93 \times 10^{-1}$
Oxigênio líquido	kg	$5,17 \times 10^{-4}$
Peróxido de hidrogênio, solução em 50%	kg	$9,80 \times 10^{-6}$

Propileno glicol	kg	$1,34 \times 10^{-3}$
Químico orgânico	kg	$4,01 \times 10^{-2}$
Sulfato de alumínio	kg	$7,00 \times 10^{-3}$
Sulfóxido de dimetilo *	kg	$4,42 \times 10^{-3}$
Xileno	kg	$1,05 \times 10^{-4}$
Saídas		
Auxiliares e Energia - Montagem de Cristal Líquido	kg	$1,00 \times 10^0$
Ácido acético	kg	$3,54 \times 10^{-4}$
Acetona	kg	$1,24 \times 10^{-5}$
Ácido bórico	kg	$9,13 \times 10^{-8}$
Ácido fosfórico	kg	$3,23 \times 10^{-6}$
Água	kg	$9,50 \times 10^1$
Amônia	kg	$4,15 \times 10^{-3}$
Antimônio	kg	$7,60 \times 10^{-9}$
Arsênio, íon	kg	$7,60 \times 10^{-9}$
Boro	kg	$3,05 \times 10^{-7}$
Cádmio, íon	kg	$7,60 \times 10^{-9}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$6,62 \times 10^{-6}$
Chumbo	kg	$4,11 \times 10^{-7}$
Cianeto	kg	$2,44 \times 10^{-7}$
Cicloexanol	kg	$3,23 \times 10^{-6}$
Cloreto de hidrogênio	kg	$4,04 \times 10^{-3}$
Cobre	kg	$6,12 \times 10^{-8}$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$7,12 \times 10^{-3}$
Compostos plásticos	kg	$6,40 \times 10^{-2}$
Cromo VI	kg	$1,53 \times 10^{-8}$
Cromo, íon	kg	$5,89 \times 10^{-7}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$1,16 \times 10^{-3}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$1,79 \times 10^{-4}$
Dietilenoglicol	kg	$6,46 \times 10^{-6}$
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	kg	$1,53 \times 10^{-9}$
Fenol	kg	$1,53 \times 10^{-8}$
Ferro, íon	kg	$1,75 \times 10^{-7}$
Fluoreto	kg	$8,53 \times 10^{-4}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$3,47 \times 10^{-3}$
Fluoreto de nitrogênio	kg	$1,79 \times 10^{-6}$
Fosfato	kg	$1,53 \times 10^{-8}$
Fosfina	kg	$4,17 \times 10^{-3}$
Fósforo	kg	$2,87 \times 10^{-3}$
Hexafluoreto de enxofre	kg	$7,15 \times 10^{-6}$
Hidrocarbonos aromáticos	kg	$3,92 \times 10^{-5}$
Hidrogênio	kg	$8,87 \times 10^{-6}$
Hidróxido de tetrametilamônio	kg	$4,29 \times 10^{-2}$
Lodo	kg	$5,88 \times 10^{-3}$

Manganês	kg	$1,53 \times 10^{-8}$
Mercúrio	kg	$6,46 \times 10^{-9}$
Níquel, íon	kg	$1,53 \times 10^{-8}$
Nitrogênio	kg	$5,29 \times 10^{-3}$
Óleo mineral branco	kg	$1,07 \times 10^{-3}$
Óleos não especificados	kg	$1,35 \times 10^{-5}$
Óxido de nitrogênio	kg	$1,79 \times 10^{-5}$
Sólidos inorgânicos	kg	$5,03 \times 10^{-4}$
Solvente	kg	$1,23 \times 10^{-1}$
Tetrahidroborato de sódio	kg	$1,19 \times 10^{-3}$
Trifluoreto de boro	kg	$6,12 \times 10^{-4}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Auxiliares e Energia - Montagem do Monitor LCD 17"

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade	MJ	$6,23 \times 10^{-1}$
Aço	kg	$2,25 \times 10^{-1}$
Água	kg	$4,14 \times 10^{-2}$
Auxiliares menores e auxiliares LCD	kg	$1,00 \times 10^0$
Borracha sintética - SBR	kg	$4,05 \times 10^{-3}$
Circuito integrado - lógico	kg	$8,20 \times 10^{-3}$
Cloreto polivinílico	kg	$9,57 \times 10^{-2}$
Cobre	kg	$3,10 \times 10^{-3}$
Nylon 6*	kg	$6,30 \times 10^{-3}$
Placa de circuito impresso	kg	$1,62 \times 10^{-1}$
Policarbonato	kg	$9,38 \times 10^{-2}$
Retroiluminação - Backlight	kg	$4,31 \times 10^{-1}$
Sputtering, ITO*	m ³	$5,59 \times 10^{-8}$
Vidro LCD	kg	$2,96 \times 10^{-1}$
Saídas		
Auxiliar e Energia - Montagem Monitor LCD 17	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduos não especificados	kg	$1,36 \times 10^0$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Auxiliares menores e auxiliares - LCD

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$1,28 \times 10^2$
Acetona	kg	$2,68 \times 10^{-3}$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$1,12 \times 10^{-2}$
Ácido nítrico, solução em 50%	kg	$3,23 \times 10^{-3}$
Ácido sulfúrico	kg	$5,96 \times 10^{-2}$
Água	kg	$3,74 \times 10^2$
Amônia, líquida	kg	$7,62 \times 10^{-3}$
Argônio, líquido	kg	$2,05 \times 10^{-3}$
Cal hidratada	kg	$3,62 \times 10^{-2}$
Cicloexanol	kg	$4,04 \times 10^{-3}$
Cloro gasoso	kg	$4,04 \times 10^{-3}$
Diisocianato de tolueno (TDI)	kg	$8,02 \times 10^{-6}$
Dióxido de carbono, líquido	kg	$9,74 \times 10^{-6}$
Etanol, solução em 99,7%	kg	$3,52 \times 10^{-3}$
Etileno glicol	kg	$2,11 \times 10^{-4}$
Fibra de vidro*	kg	$3,82 \times 10^{-7}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,10 \times 10^{-3}$
Hidrogênio líquido	kg	$1,16 \times 10^{-1}$
Hidróxido de sódio, solução em 50%	kg	$9,35 \times 10^{-2}$
Isopropanol	kg	$9,09 \times 10^{-2}$
Nitrogênio líquido	kg	$1,54 \times 10^0$
Oxigênio líquido	kg	$2,02 \times 10^{-3}$
Peróxido de hidrogênio, solução em 50%	kg	$3,83 \times 10^{-5}$
Polarizador filtro cores - LCD	kg	$2,19 \times 10^{-2}$
Policarbonato	kg	$2,53 \times 10^{-4}$
Propilenoglicol, líquido	kg	$5,22 \times 10^{-3}$
Sulfato de alumínio*	kg	$2,73 \times 10^{-2}$
Xileno	kg	$4,09 \times 10^{-4}$
Ácido acético	kg	$1,67 \times 10^{-3}$
Ácido fosfórico*	kg	$1,03 \times 10^{-2}$
Fosfato*	kg	$4,82 \times 10^{-2}$
Krypton*	kg	$6,72 \times 10^{-6}$
Metiletilcetona*	kg	$1,91 \times 10^{-6}$
Químico orgânico	kg	$1,57 \times 10^{-1}$
Sulfóxido de dimetilo*	kg	$1,73 \times 10^{-2}$
Saídas		
Acetona	kg	$4,84 \times 10^{-5}$
Ácido acético*	kg	$3,54 \times 10^{-4}$
Ácido bórico	kg	$3,57 \times 10^{-7}$
Ácido fosfórico	kg	$1,26 \times 10^{-5}$
Água Resíduo	kg	$3,74 \times 10^2$

Amônia	kg	$1,62 \times 10^{-2}$
Antimônio	kg	$2,97 \times 10^{-8}$
Arsênio, íon	kg	$2,97 \times 10^{-8}$
Auxiliares menores - LCD	kg	$1,00 \times 10^0$
Boro	kg	$1,19 \times 10^{-6}$
Cádmio, íon	kg	$2,97 \times 10^{-8}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$2,58 \times 10^{-4}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$2,58 \times 10^{-4}$
Chumbo	kg	$1,61 \times 10^{-6}$
Cianeto	kg	$9,53 \times 10^{-7}$
Cicloexanol	kg	$1,26 \times 10^{-5}$
Cloreto de hidrogênio	kg	$1,58 \times 10^{-2}$
Cobre, íon	kg	$2,39 \times 10^{-7}$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$2,78 \times 10^{-2}$
Cromo VI	kg	$5,96 \times 10^{-8}$
Cromo, íon	kg	$2,30 \times 10^{-6}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$4,53 \times 10^{-3}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$6,98 \times 10^{-4}$
Dietileno glicol	kg	$2,52 \times 10^{-5}$
Etano, 1, 1, , tricloro- HCFC-140	kg	$5,96 \times 10^{-9}$
Fenol	kg	$5,96 \times 10^{-8}$
Ferro, íon	kg	$6,85 \times 10^{-7}$
Fluoreto	kg	$3,33 \times 10^{-3}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,36 \times 10^{-2}$
Fluoreto de nitrogênio	kg	$6,98 \times 10^{-6}$
Fosfato	kg	$5,96 \times 10^{-8}$
Fosfina	kg	$1,63 \times 10^{-2}$
Fósforo	kg	$1,12 \times 10^{-3}$
Hexafluoreto sulfúrico	kg	$2,79 \times 10^{-5}$
Hidrocarbonetos, aromáticos	kg	$1,53 \times 10^{-4}$
Hidrogênio	kg	$3,46 \times 10^{-5}$
Hidróxido de tetrametilamônio	kg	$1,67 \times 10^{-1}$
Manganês	kg	$5,96 \times 10^{-8}$
Mercurio	kg	$2,52 \times 10^{-8}$
Níquel, íon	kg	$5,96 \times 10^{-8}$
Nitrogênio	kg	$2,07 \times 10^{-2}$
Óleos, não especificado	kg	$5,26 \times 10^{-5}$
Óxido de nitrogênio	kg	$7,01 \times 10^{-5}$
Sólidos, inorgânicos	kg	$1,97 \times 10^{-3}$
Tetrahidroborato de sódio	kg	$4,64 \times 10^{-3}$
Trifluoreto de boro	kg	$2,39 \times 10^{-3}$

Polarizador de Cores - LCD

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$1,19 \times 10^3$
Acetona líquida	kg	$1,29 \times 10^{-1}$
Acetato de etilo*	kg	$1,21 \times 10^{-2}$
Ácido bórico*	kg	$9,12 \times 10^{-3}$
Ácido clorídrico, solução em 30%	kg	$6,95 \times 10^{-2}$
Ácido nítrico, solução em 50%	kg	$1,41 \times 10^{-1}$
Ácido sulfúrico	kg	$1,98 \times 10^{-1}$
Água	kg	$2,60 \times 10^3$
Bórax*	kg	$1,14 \times 10^{-3}$
Cicloexanol	kg	$4,86 \times 10^{-2}$
Dimetil sulfóxido*	kg	$1,79 \times 10^{-1}$
Dióxido de carbono líquido	kg	$6,02 \times 10^{-2}$
Dipropilenoglicol	kg	$5,02 \times 10^{-1}$
Etanol, solução em 99,7%	kg	$1,46 \times 10^{-1}$
Heptano*	kg	$1,29 \times 10^{-1}$
Hidrogênio líquido	kg	$3,92 \times 10^{-5}$
Metiletilcetona*	kg	$6,05 \times 10^{-3}$
Monocloropentafluoroetano*	kg	$3,43 \times 10^{-3}$
Nitrogênio líquido	kg	$1,46 \times 10^0$
Químicos orgânicos	kg	$6,30 \times 10^{-1}$
Resina de poliéster insaturada	kg	$7,81 \times 10^{-3}$
Solvente*	kg	$1,03 \times 10^{-1}$
Tereftalato de polietileno granulado, amorfo	kg	$7,92 \times 10^{-1}$
Tetraidrofurano (THF)*	kg	$4,78 \times 10^{-2}$
Tolueno, líquido	kg	$3,44 \times 10^{-1}$
Vapor, para processos químicos*	kg	$1,81 \times 10^0$
Saídas		
Polarizador LCD	kg	$1,00 \times 10^0$
Resíduos sólidos não especificados	kg	$4,19 \times 10^0$
Acetato de etilo	kg	$3,05 \times 10^{-5}$
Água	kg	$2,44 \times 10^3$
Água Resfriamento	kg	$1,59 \times 10^2$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$1,02 \times 10^{-2}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$1,02 \times 10^{-2}$
Cloreto de hidrogênio	kg	$9,15 \times 10^{-5}$
Comp. Org. Voláteis Não Metanos (NMVOC)	kg	$9,71 \times 10^{-4}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$1,68 \times 10^{-2}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$2,76 \times 10^{-2}$
Fósforo	kg	$3,10 \times 10^{-4}$
Heptano	kg	$9,71 \times 10^{-3}$
Hidrocarbonetos	kg	$3,50 \times 10^{-3}$

Metiletilcetona	kg	$1,69 \times 10^{-3}$
Nitrogênio	kg	$7,14 \times 10^{-3}$
Sólidos suspensos	kg	$8,08 \times 10^{-3}$
Solvente	kg	$1,08 \times 10^0$
Tolueno	kg	$3,44 \times 10^{-1}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Retroiluminação - Backlight - LCD

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - Mix	MJ	$4,43 \times 10^0$
Aço	kg	$2,49 \times 10^{-2}$
Água	kg	$1,90 \times 10^2$
Alumínio	kg	$3,32 \times 10^{-2}$
Argônio, líquido	kg	$3,50 \times 10^{-5}$
Borracha sintética, SBR	kg	$5,95 \times 10^{-4}$
Cabo de fita de 20 pinos*	kg	$3,40 \times 10^{-3}$
Chumbo	kg	$1,06 \times 10^{-3}$
Cobre	kg	$6,74 \times 10^{-4}$
Etanol, solução em 99,7%	kg	$4,58 \times 10^{-5}$
Etileno glicol	kg	$9,19 \times 10^{-5}$
Krypton*	kg	$6,25 \times 10^{-5}$
Mercúrio*	kg	$3,95 \times 10^{-6}$
Policarbonato	kg	$1,13 \times 10^{-1}$
Polietileno tereftalato granulado	kg	$2,71 \times 10^{-2}$
Polimetilmetacrilato granulado	kg	$7,50 \times 10^{-1}$
Químicos inorgânicos*	kg	$2,77 \times 10^{-4}$
Químicos orgânicos	kg	$2,07 \times 10^{-4}$
Tubo de vidro borossilicato	kg	$4,10 \times 10^{-2}$
Saídas		
Retroiluminação - Backlight	kg	$1,00 \times 10^0$
Água	kg	$8,35 \times 10^1$
Água de resfriamento	kg	$1,15 \times 10^1$
Água residual	kg	$9,50 \times 10^1$
Etanol	kg	$4,58 \times 10^{-5}$
Éter dietílico	kg	$9,17 \times 10^{-5}$
Óxido de nitrogênio	kg	$2,89 \times 10^{-2}$
Resíduos perigosos	kg	$6,73 \times 10^{-3}$
Resíduos plásticos	kg	$5,20 \times 10^{-3}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

Vidro LCD

Produtos	Unidade	Quantidade
Entradas		
Eletricidade - mix	MJ	$3,08 \times 10^1$
Água	kg	$7,25 \times 10^0$
Amônia líquida	kg	$2,00 \times 10^{-3}$
Barite*	kg	$5,26 \times 10^{-2}$
Carbonato de Cobre*	kg	$5,88 \times 10^{-2}$
Carbonato de potássio*	kg	$6,72 \times 10^{-2}$
Carbonato de sódio*	kg	$8,67 \times 10^{-2}$
Cério*	kg	$5,84 \times 10^{-4}$
Cromo*	kg	$1,08 \times 10^{-5}$
Fluoreto de hidrogênio	kg	$1,69 \times 10^{-2}$
Óxido de alumínio	kg	$5,95 \times 10^{-3}$
Oxigênio líquido	kg	$2,01 \times 10^{-3}$
Químico Orgânico	kg	$1,08 \times 10^{-5}$
Silício	kg	$4,43 \times 10^{-1}$
Solvente*	kg	$2,10 \times 10^{-4}$
Zircônio*	kg	$9,63 \times 10^{-3}$
Saídas		
Vidro LCD	kg	$1,00 \times 10^0$
Água	kg	$5,49 \times 10^0$
Água de resfriamento	kg	$4,90 \times 10^{-1}$
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	kg	$6,52 \times 10^{-7}$
Carbono Orgânico Total (COT)	kg	$6,52 \times 10^{-7}$
Chumbo	kg	$9,31 \times 10^{-6}$
Cloreto	kg	$2,17 \times 10^{-1}$
Cromo	kg	$2,96 \times 10^{-8}$
Cromo, íon	kg	$1,76 \times 10^{-8}$
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	kg	$1,76 \times 10^{-6}$
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	kg	$1,76 \times 10^{-6}$
Ferro	kg	$5,93 \times 10^{-4}$
Fluoreto	kg	$6,30 \times 10^{-4}$
Níquel	kg	$1,76 \times 10^{-8}$
Nitrato	kg	$8,47 \times 10^{-7}$
Óleos não especificados	kg	$1,55 \times 10^{-3}$
Sólidos inorgânicos	kg	$7,78 \times 10^{-1}$
Sólidos suspensos	kg	$1,55 \times 10^{-3}$

* Materiais sem contabilização na carga ambiental, somente balanço de massa.

APÊNDICE D: FLUXOGRAMAS

ACV - Computador com Monitor CRT

Plano de processo GaBi:Quantidades de referência
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

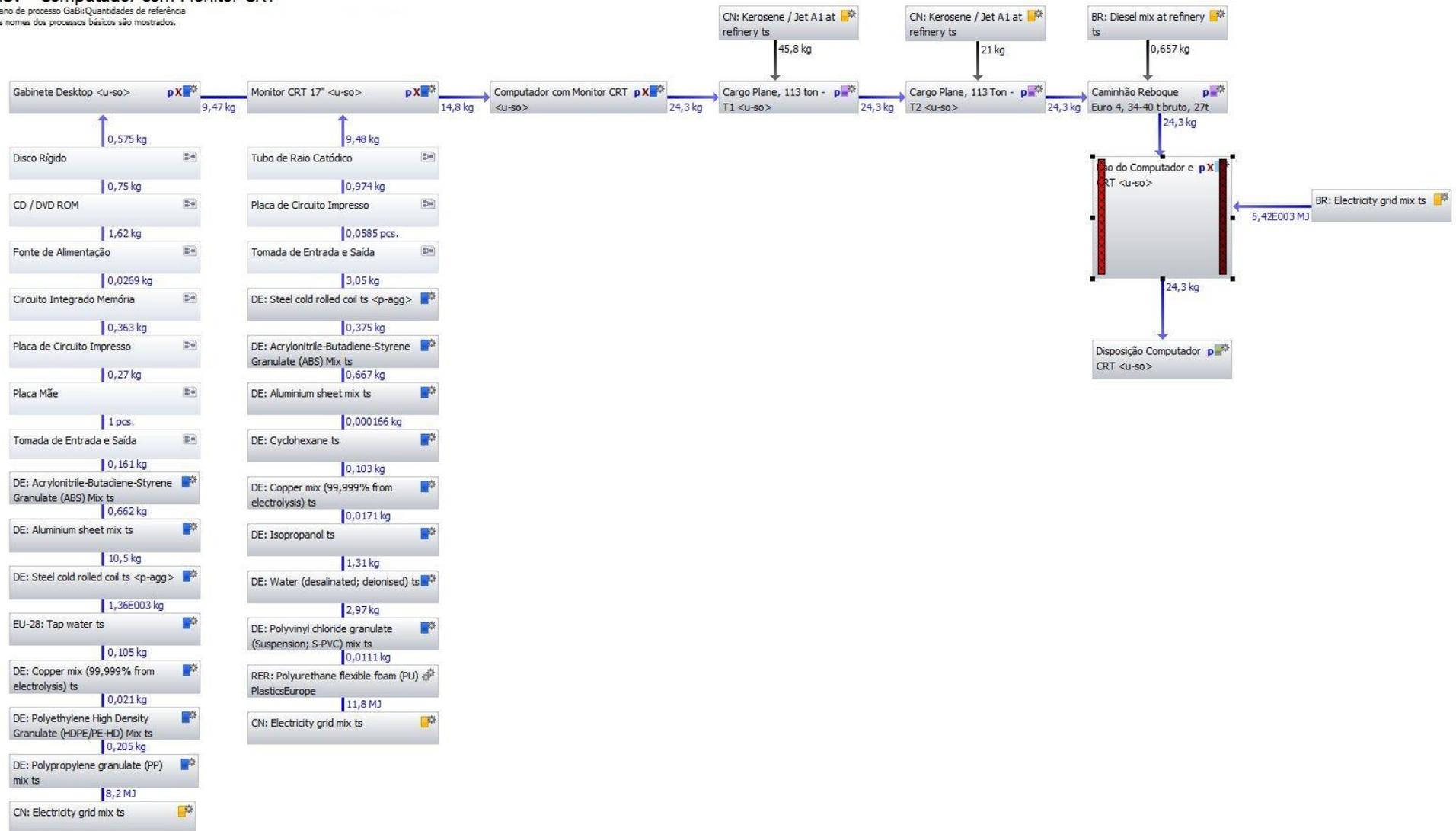


Figura 11 – Cenário de Referência CRT - Ciclo de vida do computador com Monitor CRT 17".

ACV - Computador com Monitor LCD

Plano de processo Gabii: Quantidades de referência
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

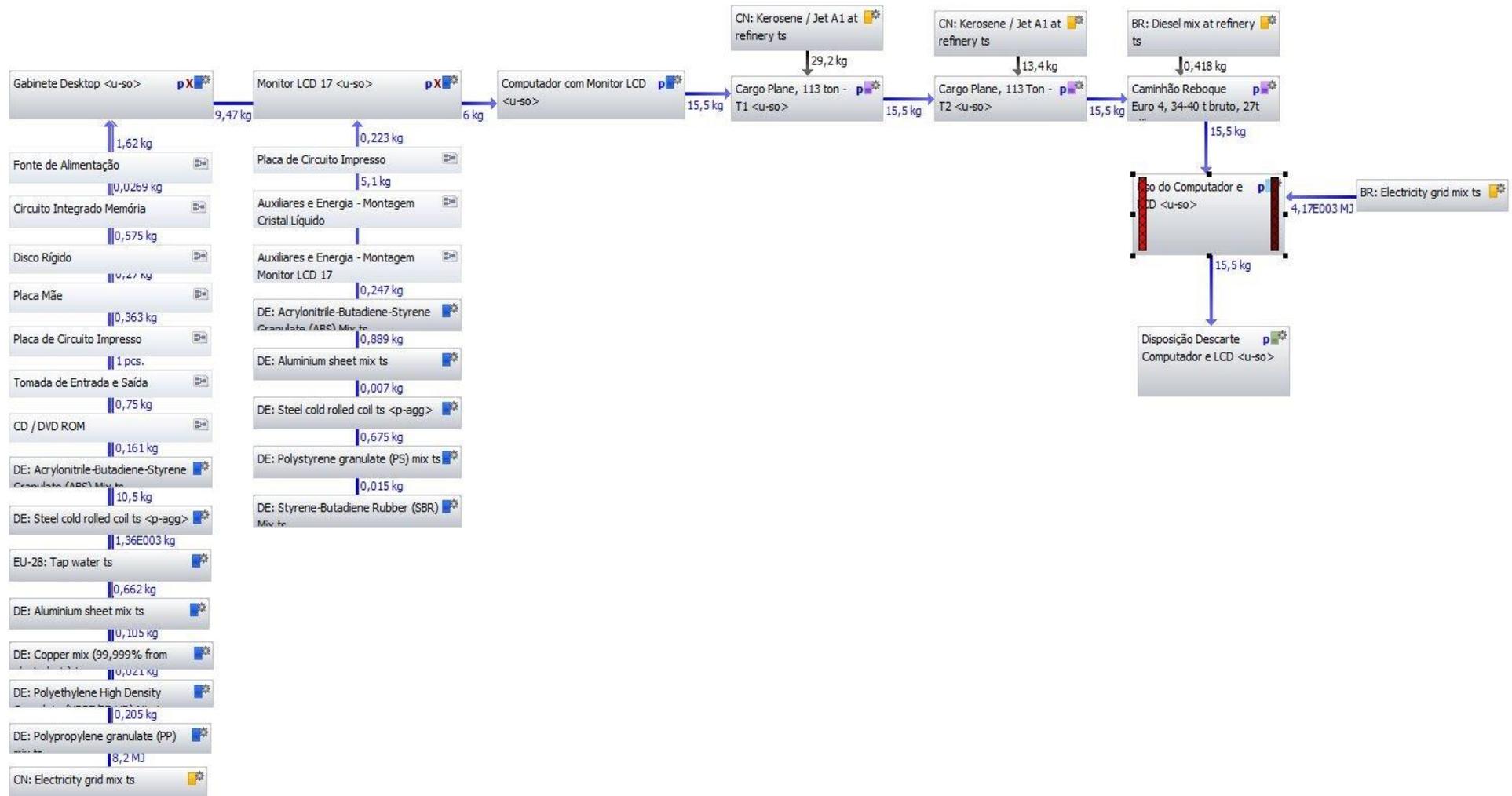


Figura 12 – Cenário de Referência LCD - Ciclo de vida do computador com Monitor LCD 17".