

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE LÂMPADAS:
UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

Morgana Decker

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares

Co-orientador: Msc. Guilherme Marcelo Zanghelini

2014/1



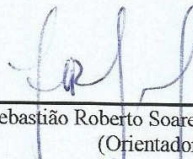
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE LÂMPADAS:
UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

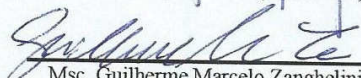
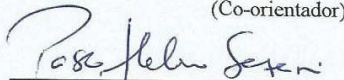
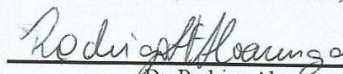
MORGANA DECKER

Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para Conclusão do Curso em
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
– TCC II

Banca Examinadora :



Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares
(Orientador)


Msc. Guilherme Marcelo Zanghelini
(Co-orientador)
Prof. Dr. Pablo Sezerino
(Membro da Banca)
Dr. Rodrigo Alvarenga
(Membro da Banca)

Florianópolis (SC)
Julho / 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à UFSC, pela oportunidade de estar concluindo meus estudos em uma universidade conceituada.

Ao Professor Sebastião pelo apoio à orientação e pela confiança de alcançarmos bons resultados!

Ao Guilherme, meu co-orientador, por sua disponibilidade, paciência e compreensão em me orientar, mas também pela confiança e amizade!

Aos demais professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelas suas contribuições à minha vida profissional, mas também à minha vida pessoal, me tornando uma pessoa correta e consciente.

Agradeço aos meus pais, José e Teresinha, pelo amor incondicional e por me tornarem possível eu estar aqui hoje, finalizando esta etapa tão importante da minha vida. Agradeço pela dedicação, pela compreensão e por sempre acreditarem e incentivarem a realização de novos desafios.

Agradeço também às minhas irmãs, Patrícia, Helena e Luciana, e aos meus cunhados, Diego e André, por estarem sempre presentes, ajudando e me guiando a partir de suas experiências, vibrando com as minhas conquistas e me confortando nos momentos difíceis. A vocês meu muito obrigada sempre!

Às minhas amigas companheiras de apartamento (e chefes), Grazieli e Mayara, por me incentivarem na realização deste TCC e tornaram mais fáceis os momentos de desespero, estando sempre disponíveis para conversar e me guiar.

Aos meus amigos de graduação, pelos inúmeros momentos que sempre farão parte das nossas vidas! Em especial às amigas Luisa, Mariana e Grazieli, por nosso companheirismo durante os desafios, mas também por todos os momentos alegres e inesquecíveis que passamos juntas!

Às amigas de infância, embora muitas vezes distantes, sempre presentes e compreensivas.

Aos membros e do CICLOG, principalmente o Edivan, por auxiliar no desenvolvimento do TCC, dividindo seus conhecimentos e contribuindo positivamente para o desenvolvimento deste trabalho, mas também às ex-integrantes do grupo, Cristiane e Franciele, que me mostraram a ACV e me inseriram no universo da pesquisa.

A toda equipe SERENCO, pelo excelente estágio, e pela compreensão quanto aos momentos de ausência para realização deste TCC.

Enfim, meu muito obrigada a todos os envolvidos direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A avaliação de Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma metodologia de gestão ambiental para avaliar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto ou serviço. O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma revisão crítica dos trabalhos de ACV que avaliam o desempenho ambiental das lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED. A metodologia aplicada foi uma revisão integrativa, a qual teve como base um grupo de publicações selecionadas por meio de palavras-chave específicas. Foram considerados trabalhos de 2002 a 2013, encontrados nas bases de dados SCOPUS, SCIELO e WEB OF KNOWLEDGE, além de documentos oficiais. Um total de 14 publicações respeitaram os critérios de seleção adotados, das quais 9 utilizaram como sistema de produto as lâmpadas incandescentes, 11 as fluorescentes e 7 as de LED. Os trabalhos foram analisados quanto às definições metodológicas: unidade funcional (UF), fronteira e inventário do ciclo de vida (ICV), mas também em relação aos resultados apresentados para as categorias de impacto: depleção abiótica, aquecimento global, eutrofização e acidificação. As discussões realizadas permitiram afirmar que a substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes ou de LED é válida, diminuindo drasticamente os impactos ambientais quanto às categorias de impacto, contribuindo não somente para a economia de energia, mas principalmente à diminuição de emissões de poluentes lançados aos rios, solo e ar diariamente.

Palavras-chave: Revisão Integrativa, Avaliação do Ciclo de Vida, Lâmpada Incandescentes, Lâmpada Fluorescentes, Lâmpada de LED.

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is an environmental management methodology developed to assess the environmental impacts associated with the life cycle of products and services. The aim of this work was to critically review the LCA studies that evaluated the environment performance of the incandescent, fluorescent and LED lamps. The methodology applied was an integrative review of publications selected by specific keywords. We included studies published from 2002 to 2013, using SCOPUS, SCIELO and WEB OF KNOWLEDGE databases, and official documents. A total of 14 publications were complied with the criteria adopted, in which 9 of them used as the product system the incandescent lamp, 11 the fluorescent lamp and 7 the LED lamp. These articles were analyzed by methodological aspects: functional unit (FU), boundaries, and life cycle inventories (LCI), but also by the results showed for the impact categories of each work: abiotic depletion, global warming, eutrophication and acidification. The comparative assessment as a result of this integrative review allowed us to conclude that the replacement of the incandescent lamp for fluorescent or LED lamps is valid, drastically decreasing the environmental impacts of the impact categories, and contributing not only to energy savings but mainly to the reduction of pollutant emissions daily launched to the rivers, to the soil and to the air.

Keywords: Integrative Review, Life Cycle Assessment, incandescent Lamp, Fluorescent Lamp, LED Lamp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da ACV.....	17
Figura 2: Inventário do Ciclo de Vida.....	19
Figura 3: Avaliação de Impactos Ambientais.....	22
Figura 4: Lâmpada incandescente.....	25
Figura 5: Lâmpada fluorescente.....	26
Figura 6: Lâmpada de LED.....	28
Figura 7: Evolução temporal das publicações selecionadas.....	35
Figura 8: Lâmpadas utilizadas nas publicações.....	36
Figura 9: Fronteiras utilizadas nas publicações.....	37
Figura 10: Métodos de ACV.....	37
Figura 11: Softwares utilizados.....	38
Figura 12: Potências das lâmpadas incandescentes.....	40
Figura 13: Categorias de impacto das lâmpadas incandescentes.....	43
Figura 14: Potências de lâmpadas fluorescentes.....	51
Figura 15: Fronteiras das publicações das lâmpadas fluorescentes.....	51
Figura 16: Categorias de impacto das lâmpadas fluorescentes.....	54
Figura 17: Potências das lâmpadas de LED.....	60
Figura 18: Fronteiras utilizadas nas publicações das lâmpadas de LED.....	61
Figura 19: Categorias de impacto para as lâmpadas de LED.....	63
Figura 20: Comportamento das três lâmpadas para depleção abiótica, eutrofização e acidificação (adaptado de DoE, 2012e).....	68
Figura 21: Comportamento das três lâmpadas para aquecimento global (adaptado de DoE, 2012e).....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais categorias de impacto da ACV	20
Quadro 2: Compilação de publicações selecionadas.....	33
Quadro 3: Lâmpadas utilizadas por artigo.....	35
Quadro 4: Publicações de lâmpadas incandescentes	39
Quadro 5: Definições metodológicas das lâmpadas incandescentes	40
Quadro 6: Composição das lâmpadas incandescentes.....	41
Quadro 7: Análise de metais para lâmpadas incandescentes.....	43
Quadro 8: Depleção abiótica para lâmpadas incandescentes	44
Quadro 9: Comparativo de fontes energéticas para Depleção Abiótica	45
Quadro 10: Aquecimento global para lâmpadas incandescentes.....	46
Quadro 11: Comparativo de fontes energéticas para Aquecimento Global.....	47
Quadro 12: Eutrofização para lâmpadas incandescentes.....	48
Quadro 13: Acidificação para lâmpadas incandescentes.....	49
Quadro 14: Publicações de lâmpadas fluorescentes	50
Quadro 15: Definições metodológicas das lâmpadas fluorescentes	52
Quadro 16: Composição das lâmpadas fluorescentes	53
Quadro 17: Análise de metais para lâmpadas fluorescentes.....	55
Quadro 18: Depleção abiótica para lâmpadas fluorescentes	55
Quadro 19: Aquecimento global para lâmpadas fluorescentes	57
Quadro 20: Eutrofização para lâmpadas fluorescentes	58
Quadro 21: Acidificação para lâmpadas fluorescentes	59
Quadro 22: Publicações de lâmpadas de LED	60
Quadro 23: Definições metodológicas das lâmpadas de LED	61
Quadro 24: Composição das lâmpadas de LED	62
Quadro 25: Análise de metais para lâmpadas de LED	63
Quadro 26: Depleção abiótica para lâmpadas de LED.....	64
Quadro 27: Aquecimento global para lâmpada de LED.....	65
Quadro 28: Eutrofização para lâmpada de LED.....	66
Quadro 29: Acidificação para lâmpada de LED.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

CFC – Clorofluorcarboneto

CFL – Lâmpada Fluorescente Compacta

CICLOG – Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida

DoE – Departamento de Energia dos Estados Unidos

EUA – Estados Unidos da América

FL – Lâmpada Fluorescente

GEE – Gases de Efeito Estufa

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

LED – Diodo Emissor de Luz

LCI – Iniciativa do Ciclo de Vida

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UF – Unidade Funcional

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. <i>Objetivo geral</i>	12
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	12
1.2. JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. REVISÃO INTEGRATIVA	14
2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	16
2.2.1. <i>Definição de objetivo e escopo</i>	17
2.2.2. <i>Análise de inventário</i>	18
2.2.3. <i>Avaliação de impactos ambientais de ciclo de vida</i>	19
2.2.4. <i>Interpretação do ciclo de vida</i>	22
2.3. REVISÃO INTEGRATIVA EM ESTUDOS DE ACV.....	23
2.4. SISTEMA DE PRODUTO	24
2.4.1. <i>Lâmpadas incandescentes</i>	24
2.4.2. <i>Lâmpadas fluorescentes</i>	25
2.4.3. <i>Lâmpadas de LED</i>	27
2.5. INÍCIO DA ACV DE LÂMPADAS	28
3. METODOLOGIA	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	33
4.2. LÂMPADA INCANDESCENTE	38
4.2.1. <i>Impactos ambientais</i>	43
4.3. LÂMPADA FLUORESCENTE	50
4.3.1. <i>Impactos ambientais</i>	55
4.4. LÂMPADA DE LED	60

4.4.1. <i>Impactos ambientais</i>	63
4.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS TRÊS LÂMPADAS	67
5. CONCLUSÕES	70
6. RECOMENDAÇÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
8. ANEXOS	78
ANEXO I	78
ANEXO II	79
ANEXO III	80
ANEXO IV	80

1. INTRODUÇÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma metodologia de avaliação de potenciais impactos ambientais relacionados a um sistema de produto específico (podendo este ser um produto manufaturado, um processo ou um serviço) ao longo do seu ciclo de vida, englobando etapas iniciais como aquisição de matérias-primas, passando pela fase de uso, até a etapa de descarte final, reciclagem ou reutilização. (CHEHEBE, 1998; GUINEÉ et al, 2002, ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Nos últimos anos a ACV está ganhando seu espaço no contexto científico, uma vez que consiste em uma importante ferramenta de gestão ambiental para avaliação de aspectos ambientais e potenciais impactos associados ao ciclo de vida de um produto.

A preocupação com o meio em que vivemos vem aumentando cada vez mais, a partir do ideal do desenvolvimento sustentável, o qual parte do pressuposto da conscientização da sociedade para que haja uma maior preservação ambiental, garantindo uma boa qualidade de vida para as gerações futuras. Desta maneira, a engenharia busca alternativas que reduzam os impactos ambientais gerados, optando pelo uso de tecnologias e produtos mais limpos, que utilizem recursos não esgotáveis e gerem menos resíduos, reaproveitando-os sempre que possível.

A questão energética está sendo bastante estudada nas últimas décadas, principalmente após as grandes crises energéticas ocorridas no Brasil no início do século XX, fazendo com que surjam iniciativas governamentais para minimizar o consumo energético, unindo uma produção mais sustentável com uma utilização mais consciente. Uma destas iniciativas, criada em 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio e gerida pela Eletrobrás, consiste no Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o qual além de disponibilizar relatórios estatísticos anuais com dados sobre o consumo energético brasileiro gera incentivos ao mercado para a adoção de produtos com selo PROCEL, reduzindo consideravelmente os impactos ambientais a cada ano.

Dentre os maiores consumidores de energia, encontram-se as lâmpadas, sendo estas responsáveis por cerca de 20% do consumo mundial de eletricidade e por 6% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (PHILIPS, 2012). No Brasil, no ano de 2005, elas representaram 14% do consumo de energia elétrica (PROCEL, 2006). Além disso, a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de uso de 2005 (PPH, 2009), promovida pela ELETROBRÁS PROCEL, indicou que aproximadamente 530 milhões de lâmpadas (incandescentes + fluorescentes)

foram consumidas naquele ano, gerando preocupações a respeito do descarte destes produtos, quanto aos possíveis danos ambientais que a falta de uma correta destinação final possa ocasionar.

Diante disso, várias pesquisas na área de ACV estão sendo desenvolvidas a fim de analisar o desempenho ambiental das lâmpadas incandescentes, fluorescentes e/ou de LED, avaliando não somente as fases de uso das lâmpadas, como também a fase de produção. Estas pesquisas partem do princípio de que o aprimoramento das tecnologias de produção obteve lâmpadas que consomem menos energia, porém muitas vezes aliadas a processos produtivos mais poluentes ou impacantes, assim como em relação à fase de destinação final, avaliando a tecnologia de separação e reciclagem dos constituintes das lâmpadas.

Assim sendo, este trabalho visa realizar uma revisão integrativa de artigos publicados nas principais bases de dados (SCOPUS, WEB OF KNOWLEDGE e SCIELO) no período de 2002 a 2013, sob a temática da aplicação da ACV de lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED, com enfoque nas definições metodológicas do escopo da ACV, tais quais a unidade funcional, as categorias de impacto utilizadas, as fronteiras do sistema, dentre outras, e nos resultados obtidos.

A revisão integrativa permite ao pesquisador aproximar-se da problemática que deseja apreciar, traçando um panorama sobre a sua produção científica, de forma que possa conhecer a evolução do tema ao longo do tempo (BOTELHO, CUNHA e MACEDO, 2011). Inicialmente mais utilizada na área da saúde, trata-se de uma revisão literária bastante empregada atualmente por seu caráter sintetizador e conclusivo acerca dos temas analisados.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. **Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma revisão integrada sobre os estudos de avaliação de ciclo de vida de lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED, desenvolvidos entre 2002 e 2013.

1.1.2. **Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Compilar os estudos que atendam os requisitos da metodologia de pesquisa desta revisão integrativa;
- b) Contrapor as definições metodológicas dos estudos analisados;

- c) Contrapor os resultados encontrados nos estudos analisados;
- d) Identificar padrões de estudo a partir das análises realizadas.

1.2. JUSTIFICATIVA

Este trabalho surgiu na dificuldade de disponibilização de dados por parte da indústria, além da limitação tempo, sobre a evolução tecnológica das lâmpadas, pois embora existam muitos estudos nesta área, evidenciam-se muitas diferenças metodológicas e organizacionais, as quais influenciam os resultados obtidos nos estudos, havendo variações que confundem e dificultam novos estudos a serem realizados sobre o mesmo tema.

Assim, a partir de uma revisão integrativa do assunto, é possível obter maior clareza e exatidão para os novos estudos, tendo em vista que, segundo Mendes, Silveira e Galvão (2008), a revisão integrativa tem a finalidade de reunir e sintetizar resultados de pesquisas sobre um delimitado tema ou questão, de maneira sistemática e ordenada, contribuindo para o aprofundamento do conhecimento do tema investigado.

A definição do sistema de produto lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED levou em consideração o fato da evolução tecnológica marcante nas últimas décadas, modificando completamente a tecnologia envolvida em sua produção, bem como mecanismos de funcionamento. Esta evolução denota uma grande variação em termos de ciclo de vida, e, provavelmente, uma grande variação em termos de impactos ambientais.

Todavia, é necessário avaliar se o avanço da tecnologia trouxe consigo uma menor geração de impactos ambientais, partindo-se do pressuposto de que nem sempre a evolução tecnológica implica em uma evolução ambiental do produto, podendo, por exemplo, ter sido reduzido consideravelmente o consumo de energia durante a fase de uso, porém aumentado nas fases de fabricação e descarte.

Desta maneira, este trabalho visa através da revisão dos estudos realizados nesta área, permitir que problemáticas e respostas acerca do tema sejam esclarecidas, disponibilizando dados e modelos que auxiliem os próximos estudos a serem desenvolvidos, além de fornecer um diagnóstico geral do desempenho ambiental das lâmpadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. REVISÃO INTEGRATIVA

O processo de revisão da literatura requer a elaboração de uma síntese pautada em diferentes tópicos, capazes de criar uma ampla compreensão sobre o conhecimento (BOTELHO, CUNHA e MACEDO, 2011).

Existem diferentes formas de se realizar uma revisão da literatura. Elas baseiam-se em técnicas como a revisão bibliográfica tradicional, também conhecida como revisão narrativa, alicerçada no uso de métodos específicos que visam à busca de um assunto específico em acervos da literatura, e também no uso de mecanismos e metodologias utilizados por acadêmicos e pesquisadores nos campos da saúde e educação para descrever o estado da arte de um tema (BOTELHO, CUNHA e MACEDO, 2011). Uma revisão integrativa é um método específico, que resume o passado da literatura empírica ou teórica, para fornecer uma compreensão mais abrangente de um fenômeno particular (BROOME, 2006).

Mendes, Silveira e Galvão (2008) afirmam que a revisão integrativa inclui a análise de pesquisas relevantes que dão suporte para a tomada de decisão e a melhoria da prática clínica, possibilitando a síntese do estado do conhecimento de um determinado assunto, além de apontar lacunas do conhecimento que precisam ser preenchidas com a realização de novos estudos. Por conta disso, este tipo de revisão apresenta múltiplos usos principalmente na área da saúde, na qual muitos profissionais optam por revisões completas que unam métodos científicos e resultados.

Desta maneira, “a revisão integrativa possibilita a síntese de vários estudos já publicados, permitindo a geração de novos conhecimentos, pautados nos resultados apresentados pelas pesquisas anteriores” (MENDES, SILVEIRA e GALVÃO, 2008). Beyea e Nicoll (1998) apontam que para a realização de uma boa revisão integrativa, o segredo está em efetuar-se uma exaustiva busca literária, pois o acúmulo de informação permite melhores discussões e análises de resultados.

Souza, Silva e Carvalho (2010) complementam definindo-a como:

“a mais ampla abordagem metodológica referente às revisões, pois permite a inclusão de estudos experimentais e não-experimentais para uma compreensão completa do fenômeno analisado,

além de combinar dados da literatura teórica e empírica, e incorporar um vasto leque de propósitos: definição de conceitos, revisão de teorias e evidências, e análise de problemas metodológicos de um tópico particular”.

Mendes, Silveira e Galvão (2008) enumeram seis etapas fundamentais para a sua realização:

- 1^a. Etapa: Identificação do tema e seleção da questão de pesquisa;
- 2^a. Etapa: Estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão;
- 3^a. Etapa: Identificação dos estudos pré-selecionados e selecionados;
- 4^a. Etapa: Categorização dos estudos selecionados;
- 5^a. Etapa: Análise e interpretação dos resultados;
- 6^a. Etapa: Apresentação da revisão/ síntese do conhecimento.

A primeira etapa serve como norte para a construção de uma revisão integrativa. A construção deve subsidiar um raciocínio teórico e incluir definições aprendidas de antemão pelos pesquisadores. Assim, a primeira etapa do processo de elaboração da revisão integrativa se inicia com a definição de um problema e a formulação de uma pergunta de pesquisa (MENDES, SILVEIRA e GALVÃO, 2008).

“Intrinsecamente relacionada à fase anterior, a segunda etapa, busca em base de dados, deve ser ampla e diversificada, contemplando a procura em bases eletrônicas, busca manual em periódicos, as referências descritas nos estudos selecionados, o contato com pesquisadores e a utilização de material não-publicado” (SOUZA, SILVA e CARVALHO, 2010).

Mendes, Silveira e Galvão (2008) complementam que o ideal seria a inclusão de todos os artigos encontrados, ou até mesmo a aplicação de uma seleção aleatória, contudo, quando isto não é possível, o revisor deve deixar claro quais são os critérios de inclusão e exclusão adotados para a elaboração da revisão.

A terceira etapa consiste na leitura criteriosa dos títulos, resumos e palavras chave de todas as publicações completas localizadas pela estratégia de busca, para posteriormente verificar sua adequação aos critérios de inclusão do estudo. A partir da conclusão desse procedimento, elabora-se uma tabela com os estudos pré-selecionados para a revisão integrativa (BOTELHO, CUNHA e MACEDO, 2011).

A quarta etapa tem por objetivo sumarizar e documentar as informações extraídas dos artigos científicos encontrados nas fases anteriores. Essa documentação deve ser elaborada de forma concisa e fácil (BROOME, 2006).

Na quinta etapa, a partir da interpretação e síntese dos resultados, comparam-se os dados evidenciados na análise dos artigos ao referencial teórico (SOUZA, SILVA e CARVALHO, 2010). É neste momento que o revisor, fundamentado nos resultados da avaliação crítica dos estudos incluídos, realiza a comparação com o conhecimento teórico, a identificação de conclusões e implicações resultantes da revisão integrativa (MENDES, SILVEIRA e GALVÃO, 2008).

A última etapa consiste na elaboração do documento que deve contemplar a descrição das etapas percorridas pelo revisor e os principais resultados evidenciados da análise dos artigos incluídos. “*É um trabalho de extrema importância já que produz impacto devido ao acúmulo do conhecimento existente sobre a temática pesquisada*” (MENDES, SILVEIRA e GALVÃO, 2008).

Whitemore e Knafl (2005) alertam para os cuidados que os pesquisadores devem ter no momento da realização da revisão integrativa. Para os autores, sem métodos explícitos e sistemáticos, a margem de erros torna-se considerável, além disso, ressaltam que o erro pode ocorrer em qualquer fase da revisão.

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV consiste em uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos potenciais impactos associados a um produto, compreendendo as etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares que entram no sistema produtivo até a disposição do produto final (CHEHEBE, 2002).

“*A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida*” (FERREIRA, 2004). Além disso, ela está se concretizando como uma metodologia reconhecida e de prestígio na avaliação de desempenho ambiental de produtos e sistemas de produção (HUNT et al 1998).

De acordo com a norma NBR ISO 14040 (2009a), a ACV modela o ciclo de vida de um produto por meio de seu sistema de produto, que desempenha uma ou mais funções definidas. Seus estudos compreendem quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos ambientais e interpretação, conforme é apresentado na Figura 1.

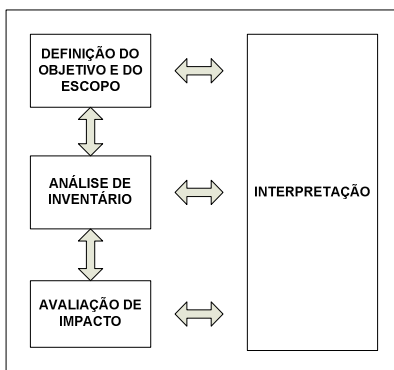


Figura 1: Etapas da ACV.

Fonte: Adaptado de NBR ISO: 14040 (2009a).

Além disso, é interessante ressaltar que a ACV apresenta aplicações diretas em desenvolvimento e melhorias de produtos, planejamento estratégico, políticas públicas, marketing, dentre outras aplicações (NBR ISO 14040, 2009a).

A seguir serão detalhadas as quatro etapas:

2.2.1. Definição de objetivo e escopo

A primeira etapa da ACV consiste na descrição do sistema de produto a ser estudado, e na apresentação do propósito do estudo, a partir da determinação do estabelecimento e de suas fronteiras. O objetivo do estudo deve especificar a aplicação pretendida e o público alvo a quem serão comunicados os resultados (NBR ISO 14040, 2009a).

Além disso, é importante que a unidade funcional seja definida nesta fase da análise, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, de forma a quantificar o sistema e permitir a determinação de fluxos de referência (NBR ISO: 14040, 2009a).

De acordo com a norma NBR ISO 14040 (2009a), esta etapa deve apresentar:

- Sistema de produto a ser estudado;
- Definição das fronteiras do sistema;
- Definição das unidades do processo;
- Estabelecimento das funções do sistema de produto;
- Estabelecimento da unidade funcional do sistema;

- Procedimentos de alocação (divisão de cargas ambientais entre os co-produtos);
- Requisitos dos dados;
- Hipóteses e limitações;
- Categorias de impacto selecionadas e metodologia para avaliação de impactos;
- Tipo e formato de relatório necessário ao estudo;
- Critérios para a revisão crítica (quando necessária).

Algumas definições são importantes de serem esclarecidas para o melhor entendimento do trabalho:

Sistema de produto: Conjunto de processos elementares que desempenham uma ou mais funções e que modela o ciclo de vida do produto (HANSEN, 2013);

Unidade funcional: Consiste em uma referência para a qual se relacionem as entradas e as saídas do sistema, assegurando a comparabilidade dos resultados da ACV em uma base comum (TOSTA, 2004). Ferreira (2004) complementa, afirmando que a unidade funcional é essencial no caso de comparação entre produtos, pois fornece uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas.

Fronteiras do sistema: A fronteira do sistema delimita a abrangência do estudo em relação ao sistema natural, aos sistemas de produção de insumos e subprodutos, às fronteiras geográficas e temporais, e até mesmo em relação a produção de bens de capital e pessoas (HANSEN, 2013).

Alocação: Distribui as contribuições dos fluxos de entrada e saída e, conseqüentemente, os impactos ambientais associados a estes, entre os diferentes produtos gerados por um sistema (HANSEN, 2013).

2.2.2. Análise de inventário

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) envolve fundamentalmente os procedimentos de coleta e cálculo de dados. As informações adquiridas, referentes aos fluxos de entrada e saída, devem estar relacionadas à unidade funcional estabelecida na fase anterior (FERREIRA, 2004).

Conforme a NBR ISO 14040 (2009a), esta etapa compreende:

- Coleta de dados;
- Cálculos com os dados;
- Alocação de fluxos e liberações (quando necessários).

Esta é a parte mais minuciosa da ACV e dela depende a confiabilidade dos resultados obtidos nas outras etapas. Também é relevante destacar que com relação aos cálculos realizados, é importante considerar procedimentos de alocação para os processos que produzam mais de uma saída ou para materiais que sejam reciclados (DoE, 2012d).

Os inventários possibilitam a identificação de limitações ou a necessidade de maiores informações para a avaliação do processo e podem gerar mudanças nos procedimentos de coleta de dados, revisão dos objetivos ou do escopo. A consistência dos dados viabiliza a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis (NBR ISO: 14044, 2009b).

Chehebe (1998) expõe que a construção de fluxogramas pode auxiliar no processo de identificação dos processos e intervenções ambientais mais relevantes.

O inventário do ciclo de vida deve conter as informações conforme a Figura 2.

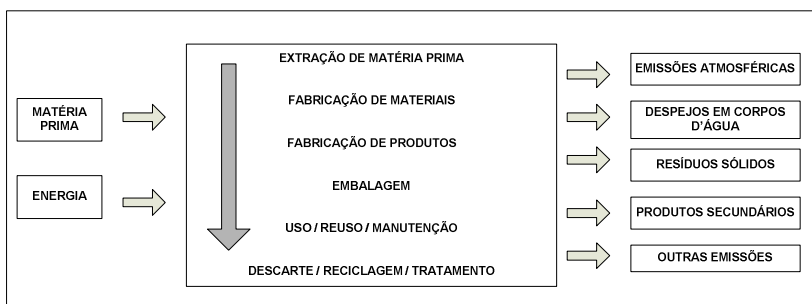


Figura 2: Inventário do Ciclo de Vida

Fonte: Adaptado de NBR ISO: 14040 (2009a).

2.2.3. Avaliação de impactos ambientais de ciclo de vida

Esta etapa corresponde ao processo quantitativo e/ou qualitativo aplicado na caracterização e avaliação dos impactos associados ao inventário do ciclo de vida. Durante esta etapa da ACV, os fluxos de materiais e energia, identificados durante o ICV, são associados a impactos ambientais. As categorias de impacto relevantes e seus respectivos potenciais de impacto são estabelecidos e é realizado o cálculo dos indicadores para cada categoria. A agregação dos resultados, por vezes ponderados, define o perfil da avaliação de impactos ambientais de ciclo de vida (AICV) e fornece informações relativas aos impactos ambientais associados ao consumo de recursos e emissões ao meio (SONNEMANN; CASTELLS; SCHUHMACHER, 2004).

A AICV permite avaliar a significância de aspectos ambientais apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em vários ou um único indicador. Os fluxos elementares do sistema são relacionados aos impactos gerados ao meio ambiente, em nível global, regional ou mesmo local (DoE, 2012d).

De acordo com a norma NBR ISO 14044 (2009b), a AICV compreende elementos obrigatórios e opcionais. Os elementos obrigatórios são:

- Seleção de categorias de impacto,
- Classificação dos resultados do inventário,
- Caracterização dos impactos.

A seleção de categorias de impacto consiste na escolha e definição da categoria de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização que compõem o método de AICV (NBR ISO 14044, 2009b). O Quadro 1 apresenta as principais categorias de impacto, exemplos de unidades de medidas, breve descrição e principais indicadores (SOUZA,2008; DoE, 2012d; HANSEN,2013).

Quadro 1: Principais categorias de impacto da ACV

CATEGORIA DE IMPACTO	INDICADOR DE IMPACTO	DESCRIÇÃO	PRINCIPAIS INDICADORES
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	kg de CFC-11 Eq.	Redução da camada de ozônio existente na estratosfera, que permite a passagem de radiação ultravioleta à superfície terrestre.	Metais, petróleo, recursos não renováveis
AQUECIMENTO GLOBAL	kg de CO ₂ Eq.	Refere-se ao aumento da temperatura terrestre na baixa atmosfera causado pela presença crescente de gases de efeito estufa como dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄).	Gases de Efeito Estufa
ACIDIFICAÇÃO	kg SO ₂ Eq.	Relacionada à liberação de íons hidrogênio (H ⁺) em ecossistemas terrestres e aquáticos	Dióxido de enxofre (SO ₂), óxidos de nitrogênio (NO _x) e amônia (NH ₃)
EUTROFIZAÇÃO	kg PO ₄ Eq.	É associada à adição de nutrientes (fertilização) em superfícies aquáticas e terrestres, o que ocasiona aumento na produção de biomassa e consequentes alterações no número de espécies do ecossistema	Nitratos e Fosfatos
DEPLEÇÃO ABIÓTICA	kg Sb Eq.	Redução de recursos naturais não bióticos que são utilizados como insumos no produto, como combustíveis fósseis e minérios.	Antimônio

CATEGORIA DE IMPACTO	INDICADOR DE IMPACTO	DESCRIÇÃO	PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS
ECOTOXICIDADE	kg 1,4-DCB Eq.	É relativa à ação prejudicial, algumas vezes irreversível, de substâncias tóxicas ao meio ambiente. Pode ser para o ar, o solo ou a água (doce ou marinha).	Substâncias tóxicas
TOXICIDADE HUMANA	kg 1,4-DCB Eq.	Esta categoria caracteriza a exposição humana a substâncias tóxicas, especialmente através da ingestão e inalação.	Substâncias tóxicas
USO DO SOLO	m ² .ano	Corresponde ao impacto da mudança da cobertura do solo, ocasionado pela transformação de uma área natural para agrícola (por exemplo) e/ou por sua ocupação em um intervalo de tempo (o que impede seu retorno à condição natural).	Uso direto e indireto do solo
FORMAÇÃO DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	kg O ₃ Eq.	Nevoeiro decorrente da reação fotoquímica entre óxidos de nitrogênio e substâncias orgânicas voláteis, que ocasionam a formação de ozônio troposférico.	Poluentes NO e COV no ambiente; combustíveis e carvão.

A NBR ISO 14044 (2009b) explica que a classificação dos resultados do inventário também é importante, uma vez que correlaciona os resultados do Inventário do Ciclo de Vida a diferentes categorias de impacto, sendo bastante qualitativa e baseada na análise científica dos aspectos ambientais.

Por fim, a caracterização dos impactos se dá a partir dos cálculos dos resultados dos indicadores para cada categoria de impacto, a partir de fatores e modelos de caracterização. Esta é uma etapa quantitativa (NBR ISO 14044, 2009b).

E os elementos opcionais, segundo a norma NBR ISO 14044 (2009b) são:

- Normalização,
- Agrupamento,
- Ponderação,
- E análise da qualidade de dados.

A normalização se baseia no cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria referente a informações de referência. Os fatores de normalização envolvidos representam o impacto potencial daquela categoria. Já o agrupamento consiste na criação de grupos de categorias de impactos, separando as categorias de acordo com afinidades ou relações, com o intuito de demonstrar resultados específicos (NBR ISO 14044, 2009b).

Como etapa qualitativa ou semi-quantitativa tem-se a ponderação, a qual pode ser compreendida como a agregação de categorias de impacto em grupos semelhantes ou na classificação delas em áreas de proteção. São avaliados os potenciais para diferentes impactos segundo sua severidade e, de acordo com o resultado, são estabelecidos diferentes fatores de ponderação: um fator para cada categoria de impacto e de dano. A norma NBR ISO: 14040 (2009a) define como a conversão dos resultados dos indicadores de cada uma das categorias a uma escala comum, por meio de fatores numéricos baseados em escolhas de valor.

A análise da qualidade de dados consiste em um processo de verificação da confiabilidade e da precisão dos resultados obtidos, expressos por meio dos indicadores.

A Figura 3 apresenta um esquema contendo todos os elementos obrigatórios e optativos da AICV.

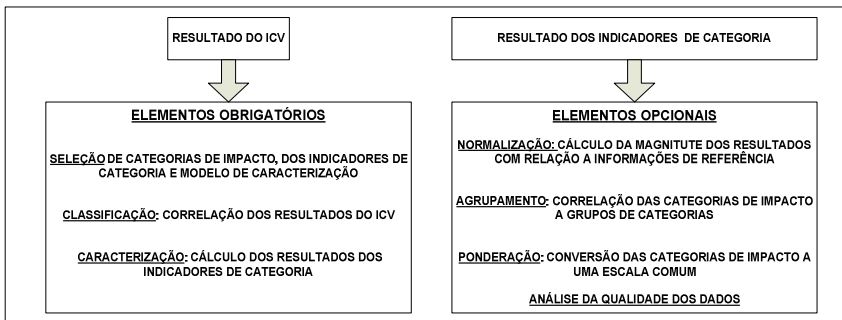


Figura 3: Avaliação de Impactos Ambientais.

Fonte: Adaptado de NBR ISO: 14040 (2009a).

2.2.4. Interpretação do ciclo de vida

A última etapa da ACV consiste na avaliação do estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos, ou seja, na análise dos resultados e na formulação de conclusões e recomendações para a minimização de impactos ambientais potencialmente gerados pelo sistema (GRAEDEL, 1998). Esta etapa inclui o a realização de conclusões e recomendações, a partir da análise do inventário e da avaliação de impactos ambientais (DoE, 2012d).

De acordo com DoE (2012d), as etapas da interpretação do ciclo de vida são:

- Identificar as contribuições significativas;

- Avaliar a integridade, da consistência e da sensibilidade dos dados;
- Redigir as conclusões e recomendações.

“A interpretação do ciclo de vida também visa a fornecer uma apresentação prontamente compreensível, completa e consistente dos resultados de uma ACV, de forma consistente com o objetivo definido” (NBR ISO 14044, 2009b).

2.3. REVISÃO INTEGRATIVA EM ESTUDOS DE ACV

A seguir são apresentados alguns artigos que utilizam a revisão integrativa como metodologia acoplada a ACV.

Willers, Rodrigues e Silva (2013) desenvolveram uma revisão bibliográfica integrativa para investigar a situação da ACV no Brasil. Os autores utilizaram como base de dados eventos e periódicos oficiais ou reconhecidos pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção e a base de dados Scielo Brasil. Como resultados, obtiveram 80 artigos selecionados, dos quais 17 artigos aplicaram efetivamente a metodologia ACV em um estudo de caso, 11 utilizaram a metodologia para avaliar processo produtivo e 6 para comparar matérias ou processos.

Outro caso de utilização de revisão integrativa em estudos de ACV consiste no artigo de Claudino e Talamini (2013), no qual se aplica este tipo de revisão com o objetivo de verificar o uso e a aplicação do *framework* da ACV no agronegócio brasileiro. A pesquisa bibliográfica foi realizada em artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sítios da internet e anais de congressos, sendo que como resultado foi obtido que a ACV ainda é pouco difundida no agronegócio interno e o número de pesquisas com esta temática é reduzido.

Marvuckia et. Al (2013) realizam um trabalho visando apresentar um levantamento de uma série de aplicações de ACV que utilizam diferentes modelos de equilíbrio, uma vez que cada autor pode adotar diferentes calores para determinada mercadoria, utilizando uma média sob hipótese de mercado totalmente elástica, limitando a ACV. Na segunda parte do trabalho, os autores revem criticamente as principais variáveis e parâmetros de apoio à definição e implementação das abordagens, propondo, em uma terceira etapa do trabalho, uma metodologia para integrar a modelagem econômica e a ACV, a fim de realizar uma ACV da produção do biogás.

Willers e Rodrigues (2014) apresentam em seu artigo uma revisão crítica sobre a situação da ACV no Brasil. A metodologia utilizada foi uma revisão integrativa, exploratória, verificando os trabalhos de

ACV brasileiros que respeitavam a ISO 14040. Primeiramente foi feita a seleção dos artigos, a partir das palavras-chave ACV, em português, espanhol e inglês. Foram obtidos 120 artigos, dos quais apenas 21 utilizavam corretamente a metodologia descrita na ISO 14040. O autores justificam esse resultado pela dificuldade de obtenção de dados primários, quanto a matérias-primas, processos, dados de entrada, reúso e reciclagem.

2.4. SISTEMA DE PRODUTO

O sistema de produto analisado neste projeto são as lâmpadas de luz nas variações: incandescente, fluorescente e de LED.

2.4.1. Lâmpadas incandescentes

Segundo Silva (2002) a lâmpada incandescente corresponde à “famosa” lâmpada de Thomas Edson, com o princípio de uma corrente elétrica passando por uma resistência – filamento, pela qual vai aquecendo até ficar brasa, ou seja, em estado de incandescência. O filamento, ficando incandescente dentro de um tubo de vidro a vácuo, gera então luz e calor. O autor ressalta que “na realidade, mais de 90% da energia consumida para ascender uma lâmpada incandescente é transformada em calor, e menos de 10% em luz”.

“As lâmpadas incandescentes são aquelas em que a corrente elétrica é passada através de um filamento espiral de tungstênio, contido num envoltório de vidro, o qual é preenchido com um gás inerte. Quando aquecido por uma corrente elétrica, o filamento emite radiação electromagnética, sendo que a temperaturas mais baixas, a radiação é emitida principalmente na parte infravermelha do espectro em forma de calor e a temperaturas mais elevadas, a proporção de radiação aumenta e a luz visível é produzida. Assim, o filamento de tungstênio começa a evaporar-se, o que ocasiona o escurecimento do interior do bulbo da lâmpada” (ELC, 2008).

Fazendo uma analogia, Silva (2012) afirma que as lâmpadas de filamento são chamadas de incandescentes justamente por imitarem o Sol.

A durabilidade média de uma lâmpada incandescente é de 750 a 1.000 horas de utilização (SILVA, 2009; OSRAM, 2009; SIMPSON,

2008). A eficiência energética de uma lâmpada consiste na relação entre o fluxo luminoso e a potência consumida. Para esta lâmpada, ela varia de 10 a 20 lumens por watt (SILVA, 2002; DoE, 2012b).

A Figura 4 representa uma lâmpada incandescente.

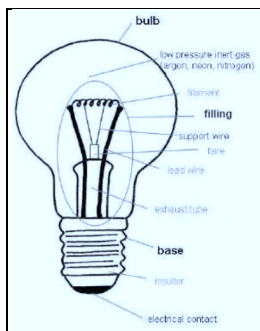


Figura 4: Lâmpada incandescente.

Fonte: OSRAM (2009).

Segundo Aman et al (2013) as vantagens das lâmpadas incandescentes são apresentarem fator de potência unitário, não apresentarem nenhuma distorção na forma de onda da corrente elétrica, e, principalmente, não conterem nenhum conteúdo de mercúrio, não necessitando assim de nenhuma técnica especial de reciclagem. Em contrapartida, a principal desvantagem dessas lâmpadas é o alto consumo de energia.

2.4.2. Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de descarga de baixa pressão, as quais operam sobre o seguinte princípio: após a ignição, o vapor de mercúrio presente no tubo de vidro é convertido pelo fósforo em luz visível, e a engrenagem de comando garante que o fluxo luminoso correto seja emitido. Em lâmpadas fluorescentes compactas integradas e lâmpadas circulares integradas a engrenagem de comando está integrada na carcaça da lâmpada, enquanto que as lâmpadas fluorescentes compactas não integradas requerem um equipamento de controle externo (ELC, 2008).

Simpson (2008) afirma que nessas lâmpadas a luz é criada por uma descarga elétrica em um gás ou a vapor. Uma pequena quantidade de mercúrio é introduzida no tubo fluorescente para promover a iluminação, sendo que o material de fósforo é usado para converter a luz ultravioleta para a saída de luz visível. O autor afirma ainda que as lâm-

padas de descarga têm uma eficiência bastante significativa e uma vida mais longa do que uma lâmpada incandescente.

“Neste caso, é possível comparar as lâmpadas de descarga, das quais as fluorescentes são as representantes mais famosas e antigas, com um raio, relâmpago, uma que vez essas lâmpadas fazem luz a partir de uma descarga elétrica, tal qual o raio, o qual corresponde a uma descarga elétrica natural que produz uma luz muito intensa” (SILVA, 2012).

Estas lâmpadas se dividem em lâmpadas fluorescentes (FL) e lâmpadas fluorescentes compactas (CFL), sendo que a diferença básica entre elas é que estas apresentam o reator integrado, com dimensões reduzidas para que possa substituir as lâmpadas incandescentes sem mudanças na instalação elétrica (Simpson, 2008).

A durabilidade média de uma lâmpada fluorescente é de 7.500 a 18.000 horas (SILVA, 2009). Para esta lâmpada, a eficiência energética varia de 50 a 80 lumens por watt (SILVA, 2002). Como nas lâmpadas fluorescentes a maior parte da energia fornecida é transformada em luz, seu rendimento pode ser até cinco vezes maior do que o das lâmpadas incandescentes, pois produzem menos calor.

A Figura 5 representa detalhadamente uma lâmpada fluorescente.

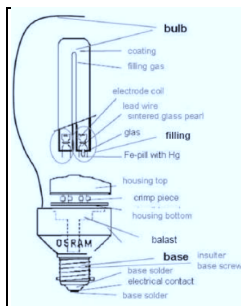


Figura 5: Lâmpada fluorescente.

Fonte: OSRAM (2009).

Silva (2002) explica que as lâmpadas fluorescentes são consideradas muito econômicas, pois se tratam de lâmpadas de descarga. Além disso, apresentam uma emissão de luz capaz de fornecer uma melhor reprodução de cores. Todavia, em relação às lâmpadas incandescentes são mais caras.

A principal desvantagem destas lâmpadas é que o material do tubo fluorescente ser considerado lixo eletrônico e necessitar de uma reciclagem adequada após o fim de sua vida útil, isso porque possui em seu interior mercúrio, assim a lâmpada não é totalmente reciclável como as incandescentes, apresentando potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. (AMAN et al, 2013) .

2.4.3. Lâmpadas de LED

“LED são as iniciais em inglês de Diodo Emissor de Luz. Ele é um dispositivo semicondutor que emite luz com um determinado comprimento de onda quando polarizado na posição direta. Isso quer dizer, em outras palavras, que o LED trabalha com polaridade” (SILVA, 2012).

Silva (2009) afirma que as lâmpadas de LED produzem luz por fotoluminescência. Partindo-se do pressuposto de que as lâmpadas incandescentes imitam o sol, as fluorescentes um relâmpago, LED imita um vagalume. Segundo o autor: *“Os LEDs avançaram de forma incrível e passam a ser utilizados em todas as áreas da iluminação, com estupenda economia de energia e durabilidade. São as estrelas dos novos projetos de iluminação”*.

Em suma, as lâmpadas de LED são dispositivos semicondutores, cheios de gases e revestidos com materiais de fósforo diferentes, e são usadas para produzir luz artificial. Ao contrário das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, as LEDs não são fontes de luz inerentemente brancas, elas emitem luz quase monocromática, tornando-as altamente eficientes para aplicações de luzes coloridas, como semáforos e sinais de saída. No entanto, para ser utilizado como uma fonte de luz em geral, é necessária a luz branca, a qual pode ser obtida por três maneiras: conversão de fósforo, sistemas RBG (*Red, blue and green*) ou um método híbrido que utiliza conversão de fósforo e lâmpadas monocromáticas (DoE, 2012a).

A durabilidade média de uma lâmpada LED é superior a 50.000 horas (SILVA, 2009). E a eficiência energética média destas lâmpadas varia de 55 a 70 lumens por watt (SILVA, 2011). De acordo com o Departamento Americano de Energia, em 2020 é esperado que estas lâmpadas atinjam uma eficiência de 235 lumens por watt (DoE, 2012c).

A Figura 6 representa uma lâmpada de LED.

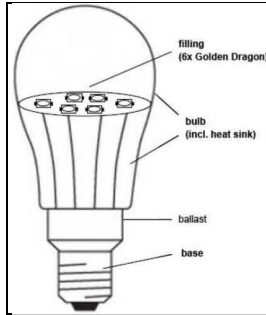


Figura 6: Lâmpada de LED.

Fonte: OSRAM (2009).

Silva (2002) estabelece como vantagens tecnológicas das lâmpadas de LED a longa durabilidade, a alta eficiência luminosa, a variedade de cores possíveis de serem emitidas, as dimensões reduzidas, a alta resistência a choques e vibrações, o baixo consumo de energia, a pequena dissipação de calor gerada, a ausência de radiação ultravioleta e infravermelha, e o fato de a luz ser dirigida. Assim, é possível visualizar-se que essas lâmpadas são realmente uma alternativa real e positiva na substituição das demais. Além disso, o autor ressalta que elas proporcionam novas possibilidades de *design*, e apresentam uma drástica redução na necessidade de manutenção, permitindo a instalação em locais de difícil acesso. Como desvantagem, as lâmpadas de LED apresentam altos custos de reciclagem devido a apresentarem um grande número de diferentes componentes (AMAN et al, 2013).

2.5. INÍCIO DA ACV DE LÂMPADAS

Pfeifer (1996) corresponde ao primeiro estudo de ACV realizado com lâmpadas. Ele comparou as lâmpadas incandescentes com as fluorescentes, chegando a resultados que, posteriormente, vieram a servir de base de dados para os demais estudos. Dentre as suas conclusões, podemos ressaltar o fato de as lâmpadas incandescentes terem apresentado um consumo de energia primária de 5 a 8 vezes maior do que as fluorescentes, sendo que de 1 a 5 % dessa energia consumida é empregada na fabricação da lâmpada, enquanto que 95 a 99% é destinada a fase de uso.

Outro estudo de grande importância para este projeto é o realizado por Ian Quirk, em 2009, o qual corresponde ao primeiro estudo de ACV que analisou lâmpadas de LED. Seu estudo foi realizado nos Esta-

dos Unidos, e partiu do pressuposto de que a iluminação constitui 22% da demanda de eletricidade dos EUA. Quanto à fase de produção, Quirk obteve dados que comprovaram que para as lâmpadas incandescentes, menos de 1% das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida ocorrem nesta etapa, enquanto que as demais lâmpadas apresentam de 10 a 30% das emissões de seus respectivos ciclos de vida. Já em relação à fase de eliminação ou reciclagem, para as três lâmpadas, os resultados foram que menos de 1% do uso de energia e de emissões de CO₂ ocorrem nesta fase da vida.

OSRAM (2009) consiste em outro estudo bastante interessante, pois além de avaliar as três tecnologias, trata-se de um estudo realizado por uma empresa fabricante de lâmpadas, logo conta com a utilização de dados primários, reais da produção, sem a necessidade de estimar ou adotar dados secundários, da bibliografia ou bancos de dados. Dentre os resultados obtidos, este estudo constatou que a fase de fabricação é insignificante em comparação à fase de utilização, para todas as três lâmpadas, uma vez que utiliza menos de 2% da demanda total de energia. Além disso, foram apresentados valores de consumo de energia primária para as lâmpadas incandescentes de 3.302 kWh, enquanto que para as demais, cerca de 670 kWh, comprovando a economia de aproximadamente 80% de energia que é feita ao optar-se pelo uso de lâmpadas fluorescentes ou de LED.

Quanto às emissões de mercúrio, uma das maiores preocupações de impactos ambientais e para a saúde humana, PFEIFER (1996) afirma que as emissões totais de mercúrio, durante todo o ciclo de vida, são praticamente iguais para as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, uma vez que as incandescentes consomem mais energia, sendo suas emissões diretamente relacionadas com seu consumo de energia, enquanto que as fluorescentes emitem mais mercúrio durante a fase de produção e principalmente disposição final. Contudo, AMAN et al. (2013) afirmam que a substituição de uma lâmpada incandescente por uma fluorescente pode reduzir até 75% das emissões de mercúrio durante a geração de energia quando a reciclagem completa da lâmpada for considerada. Os autores afirmam que mesmo nos casos em que não haja reciclagem das lâmpadas, as emissões de mercúrio das fluorescentes são inferiores do que as emissões das incandescentes.

Aman et al. (2013) consiste em um estudo comparativo entre as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED, avaliando não somente os desempenhos ambientais das lâmpadas a partir de estudos de ACV, como também quesitos como consumo energético, qualidade de iluminação e eficiência.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho é uma revisão integrativa, a qual se fundamenta nas seis etapas principais deste tipo de revisão, apresentadas e explicadas na revisão bibliográfica (item 2.1), que são:

- 1ª. Etapa: Identificação do tema e seleção da questão de pesquisa;
- 2ª. Etapa: Estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão de artigos e pesquisas;
- 3ª. Etapa: Identificação dos estudos pré-selecionados e selecionados;
- 4ª. Etapa: Categorização dos estudos selecionados;
- 5ª. Etapa: Análise e interpretação dos resultados;
- 6ª. Etapa: Apresentação da revisão/ síntese do conhecimento.

Em relação à primeira etapa, este projeto foi desenvolvido considerando-se estudos de ACV aplicados sobre os sistemas de produto lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED, com o intuito de identificar qual lâmpada, entre as três, apresenta um maior impacto ambiental associado ao seu ciclo de vida, de qual maneira os impactos se distribuem nas etapas de seus ciclos de vida, se a melhora do desempenho ambiental acompanhou o desenvolvimento do produto (da incandescente para a de LED), se as definições metodológicas seguem um padrão e de que maneira estas unidades metodológicas influenciam nos respectivos resultados.

Para a busca de estudos, foi necessária a aplicação da segunda etapa, referente a critérios de seleção de inclusão e exclusão de trabalhos. Com base nas principais bases existentes, definiram-se bases de dados que seriam utilizadas neste TCC:

- SCOPUS
- WEB OF KNOWLEDGE
- SCIELO
- DOCUMENTOS OFICIAIS DE SITES GOVERNAMENTAIS E/OU EMPRESAS DE LÂMPADAS

É importante ressaltar que foi seguida esta ordem para as bases de dados, sendo que uma mesma publicação encontrada em mais de uma base de dados é admitida como sendo da primeira onde foi encontrada.

Também foi determinado o período de publicação a ser considerado, o qual foi estabelecido entre 2002 e 2013. Foi escolhido este período pois foi em 2002 que a *United Nations Environment Programme* (UNEP), juntamente com a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), lançaram a iniciativa do ciclo de vida, proliferando a ACV pelo mundo e refletindo na quantidade de publicações. O ano de

2013 foi admitido levando-se em conta as publicações até o último ano pleno. .

Foram aplicados dois estágios de seleção de artigos. O primeiro considerou dois arranjos de palavras-chave: “LCA” e “Lamps”, e “Life Cycle Assessment” e “Lamps” (para a base SCIELO as palavras pesquisadas foram “ACV” e “Lâmpadas”, e “Avaliação do Ciclo de Vida” e “Lâmpadas”). O segundo procedimento de seleção de trabalhos envolveu a leitura do título e resumo dos artigos, descartando primeiramente aqueles que não apresentavam as palavras-chaves em seus títulos, resumos ou propriamente entre as palavras-chave, e posteriormente, também foram excluídos aqueles que não tratavam de aplicações de ACV para lâmpadas incandescentes, fluorescentes e/ou de LED, a partir de uma análise de objetivos e metodologia utilizada.

Selecionadas as publicações, foi realizada uma leitura minuciosa de cada trabalho, sendo coletados dados para a o embasamento das discussões e comparações dos resultados.

Foram dados de interesse as definições metodológicas de cada artigo, como:

- Unidade funcional;
- Fronteiras de estudo;
- Sistema de Produto em si: lâmpadas analisadas em cada artigo, assim como suas características principais como potência, fluxo luminoso e tempo de vida útil;
- Inventários do ciclo de vida das lâmpadas e/ou processos;
- Software, base de dados e método de AICV, quando informados;
- Categorias de impacto analisadas;
- Resultados numéricos obtidos;
- Fase do ciclo de vida mais impactante;
- Substâncias mais impactantes;
- E as principais conclusões de cada publicação.

Os dados obtidos foram inseridos em tabelas desenvolvidos com o auxílio do software Microsoft Excel 2007®, para que sejam utilizados na etapa seguinte de análise e interpretação dos resultados. Além disso, para a apresentação visual das análises realizadas, foram utilizados quadros e gráficos desenvolvidos a partir do Microsoft Excel 2007®, e fluxogramas desenvolvidos a partir do Microsoft Visio 2007®.

A interpretação buscou identificar padrões nos estudos e comportamentos metodológicos, correlacionando os resultados encontrados

com as definições metodológicas utilizadas, a fim de obter os motivos que levaram às conclusões dos estudos, e identificar os motivos das eventuais diferenças entre resultados e estudos, quando necessário. Esta análise é vital, dada a natureza comparativa da ACV, e a necessidade de que a comparação seja realizada nas mesmas bases metodológicas, para compreender os resultados, suas variações e limitações.

Embora não seja a maneira ideal de comparação de estudos de ACV, foi feita uma simplificação para este trabalho, na qual os resultados numéricos apresentados para as categorias de impacto de cada lâmpada foram equalizados para uma mesma UF de 10000 horas de iluminação. Assim, por conta das UFs contidas nas publicações nem sempre considerarem a intensidade da iluminação (lúmens), esta não foi levada em conta para a equalização, apenas a relação entre as horas de iluminação. Os gargalos dos sistemas foram avaliados a partir de simulações aplicadas no software SimaPro®.

Quanto à parte de análise de aspectos metodológicos desta revisão integrativa, optou-se em analisar primeiramente as publicações de modo geral, a partir dos aspectos comuns de cada trabalho, e após, observar separadamente cada lâmpada, avaliando detalhadamente cada publicação para cada lâmpada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Após a realização das pesquisas aos bancos de dados, treze de cinquenta e sete trabalhos respeitaram os critérios de seleção propostos e integraram o grupo para a presente revisão integrativa. O Quadro 2 apresenta resumidamente estas publicações, indicando o título, a referência bibliográfica, a instituição vinculada ao primeiro autor, o ano de publicação, a revista na qual o trabalho foi publicado, e a base de dados de onde foi coletado.

Quadro 2: Compilação de publicações selecionadas

Nº	TÍTULO	REFERÊNCIA	LOCAL DO ESTUDO	ANO	PUBLICAÇÃO	BASE DE DADOS
1	Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis	Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (2012)	Lituânia	2012	Environmental Research, Engineering and Management	SCOPUS
2	LCA of spent fluorescent lamps in Thailand at various rate of recycling	Apisitpuvakul et Al. (2008)	Tailândia	2008	Journal of Cleaner Production	SCOPUS
3	Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis	Weltz, Hischer e Hilty (2011)	Suíça	2011	Journal Environmental Impact Assessment Review	SCOPUS
4	Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs	Lim et. Al. (2013)	Estados Unidos	2013	Environmental Science and Technology - American Chemical Society	SCOPUS
5	Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire — a case study	Tähkämö et Al. (2013)	França	2013	Int. Journal of LCA	SCOPUS
6	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps	DoE (2012d)	Estados Unidos	2012	Building Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy	DOCUMENTOS OFICIAIS

Nº	TÍTULO	REFERÊNCIA		ANO	PUBLICAÇÃO	BASE DE DADOS
7	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part 2: LED Manufacturing and Performance	DoE (2012e)	Estados Unidos	2012	Building Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy	DOCUMENTOS OFICIAIS
8	Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps	OSRAM (2009)	Alemanha	2009	OSRAM	DOCUMENTOS OFICIAIS
9	The environmental impact of compact fluorescent lamps and incandescent lamps for Australian conditions	Parson (2006)	Austrália	2006	Journal of society for sustentability and environmental engineering, Australia	WEB OF KNOWLEDGE
10	Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies	Quirk (2009)	China e Estados Unidos	2009	Lighting Life-Cycle Assessment	WEB OF KNOWLEDGE
11	Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp	Ramroth (2008)	Estados Unidos	2008	Rocky Mountain Institute	WEB OF KNOWLEDGE
12	A Case Study of Life Cycle Assessment (LCA) on Ballast for Fluorescent lamp in Malaysia	Syafa Bakri et Al. (2008)	Malásia	2008	IEEE International Symposium on Electronics and the Environment	SCOPUS
13	Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates	Hadi et Al. (2013)	Emirados Árabes	2013	Energy for Sustainable Development	SCOPUS

É possível realizar uma análise quanto à evolução destas treze publicações ao longo do período analisado, conforme mostra a Figura 7, na qual não há uma linearidade no crescimento do número de trabalhos de ACV de lâmpadas ao longo dos anos, havendo um período de alta em 2008 e 2009, seguido de um período de baixa, em 2010, e voltando a crescer em 2012. Isso pode ser explicado pelo fato de as publicações

serem referentes a diversos países, havendo distinção do uso de metodologias, como também de interesse dos produtos. Além disso, o ano de 2012 está relacionado ao período de maior inserção das lâmpadas de LED no mercado mundial, surgindo o interesse em comparar o desempenho ambiental dessas lâmpadas com as demais.

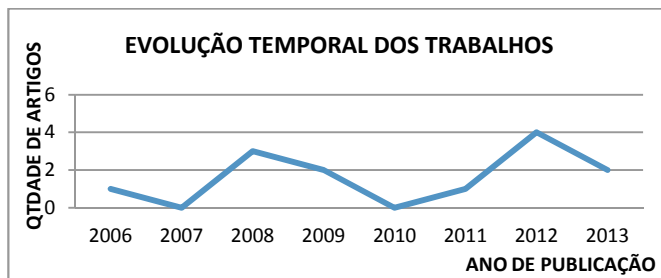


Figura 7: Evolução temporal das publicações selecionadas.

Dos treze trabalhos analisados, dez apresentam como unidades de produto as lâmpadas fluorescentes, nove as incandescentes e sete as de LED. O Quadro 3 apresenta a distribuição das lâmpadas por artigo.

Quadro 3: Lâmpadas utilizadas por artigo

ARTIGO	LÂMPADA ANALISADA		
	INCANDESCENTES	FLUORESCENTES	LED
1	X	X	
2		X	
3	X	X	
4	X	X	X
5			X
6	X	X	X
7	X	X	X
8	X	X	X
9	X	X	
10	X	X	X
11	X	X	
12		X	
13			X
TOTAL	9	11	7

A partir do Quadro 3: Lâmpadas utilizadas por artigo têm-se que cinco publicações estudam as três lâmpadas, quatro estudam as lâmpadas fluorescentes e incandescentes, duas estudam somente as fluorescentes e duas somente as de LED. Os dois trabalhos que estudam somente as de LED são mais atuais, de 2013, e os dois que analisam somente as

fluorescentes são de 2008, demonstrando possivelmente um acompanhamento do interesse da comunidade da ACV com relação à evolução da tecnologia empregada. Além disso, essa repetição de sistemas de produto entre as publicações denota a aplicação comparativa da ACV, onde a maioria dos estudos confrontou um ou mais lâmpadas. A Figura 8 ilustra estes resultados.

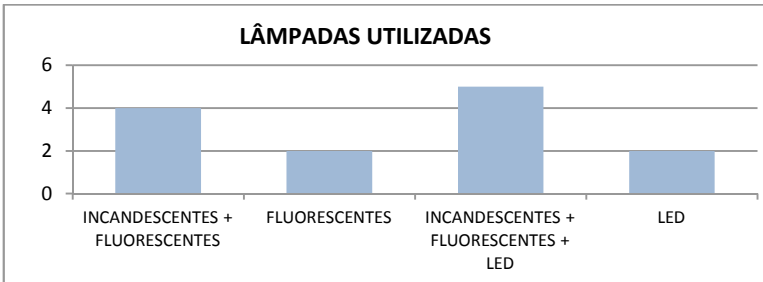


Figura 8: Lâmpadas utilizadas nas publicações

Quanto às fronteiras de estudo, Parson (2006), Ramroth (2008), Quirk (2009), OSRAM (2009), Weltz, Hischer e Hilty (2011), Balciunkevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (2012), DoE (2012d), DoE (2012e), Hadi et al. (2013) e Tähkämö et al. (2013) utilizam as etapas de aquisição de matérias-primas, manufatura, uso e pós-uso, contemplando o ciclo de vida completo das lâmpadas. Syafa Bakri et al. (2008) considera apenas as etapas de aquisição de matérias-primas, manufatura e uso, e Apisitpuvakul et al. (2008) apenas o pós-uso, estando relacionados com a preocupação ambiental quanto à disposição final adequada dos materiais.

Lim et. al. (2013) não considera o ciclo de vida das lâmpadas literalmente, realizando um estudo específico de ACV quanto aos impactos ambientais provenientes da presença de metais nas lâmpadas. A Figura 9 apresenta de maneira gráfica estes resultados, onde a categoria outros representa a publicação de Lim et. al. (2013).

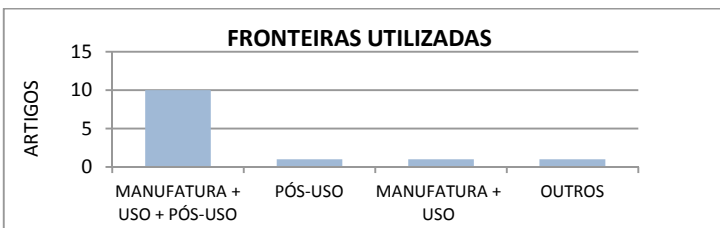


Figura 9: Fronteiras utilizadas nas publicações

Conforme a Figura 9 verifica-se a preferência pelos estudos do berço ao túmulo para estes sistemas de produto.

Também   interessante que sejam observados quais os softwares, base de dados e métodos de AICV foram utilizados pelos pesquisadores para realiza o das análises de ciclo de vida, pois os resultados encontrados podem variar de acordo com estas especifica es.

Zanghelini et al. (2012) afirmam que a principal fonte da varia o dos resultados dentre os diferentes métodos de AICV comparados não foram os fatores de caracteriza o que cada um usou, mas as substâncias que cada um compreende ou não, tornando-se imprescindível, quando na análise comparativa entre sistemas de produto, que a mesma seja baseada no mesmo método, ou que o método seja descrito com detalhes, listando-se principalmente as substâncias envolvidas na categoria de impacto e os fatores de caracteriza o utilizados.

Dos artigos Balciukevi iut , Elijo iut  e Denafas (2012), T hk m  et al. (2013), e Lim et. al. (2013) utiliza o método de AICV CML 2001, e OSRAM (2009) o CML 2000. Parson (2006), Apisitpuvakul et al. (2008), Syafa Bakri et al. (2008), Wetz, Hischier e Hilty (2011), e Hadi et al. (2013) utilizam o método Ecoindicator 99. Ramroth (2008) optou pelo método IPCC 2001, sendo que Quirk (2009), DoE (2012d) e DoE (2012e) não informaram o método utilizado. A Figura 10 apresenta graficamente estes valores.

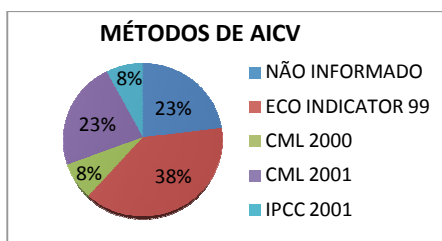


Figura 10: Métodos de ACV

Esta varia o entre a aplica o dos métodos dificulta compara es entre resultados. No entanto, nota-se uma preferência pelo Ecoindicator 99 seguido do CML 2001, ambos os métodos bastante utilizados na comunidade européia.

Quanto aos softwares utilizados para a realiza o das ACVs, Parson (2006), Apisitpuvakul et al. (2008), Syafa Bakri et al. (2008), Ramroth (2008), T hk m  et al. (2013) e Hadi et al. (2013) utilizaram o

SimaPro®, Quirk (2009), OSRAM (2009) e Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (2012) utilizaram o Gabi®, e as demais publicações não informaram qual foi o software utilizado. A Figura 11 apresenta estes valores.

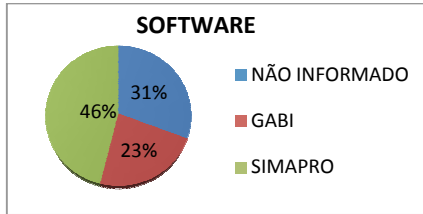


Figura 11: Softwares utilizados

De maneira geral, a análise bibliométrica nos demonstra a preferência dos pesquisadores por ACVs comparativas entre as lâmpadas, com fronteiras estabelecidas do berço ao portão, avaliadas pelo software SimaPro® através dos métodos Ecoindicator 99 e CML 2001/2000. Podemos identificar a ausência de uma evolução nas publicações desde 2002, com a inserção das lâmpadas mais recentes, i.e. Fluorescentes e de LED, nos últimos 6 anos de forma mais presente.

É importante ressaltar que a publicação de Aman et al. (2013) trata-se de um comparativo entre as lâmpadas, o qual envolve a descrição de alguns estudos de ACV de lâmpadas, dentre outros aspectos, porém não realiza diretamente a ACV. Logo, este estudo será utilizado principalmente como apoio, não integrando as discussões e estatísticas propriamente.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos seguidos das respectivas discussões para as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED.

4.2. LÂMPADA INCANDESCENTE

Das treze publicações analisadas, nove têm como objeto de estudo as lâmpadas incandescentes. O Quadro 4 apresenta um quadro contendo o título, a referência e o ano dessas publicações, mantendo a numeração de acordo com o Quadro 2. Após a realização das pesquisas aos bancos de dados, treze de cinquenta e sete trabalhos respeitaram os critérios de seleção propostos e integraram o grupo para a presente revi-

são integrativa. O Quadro 2 apresenta resumidamente estas publicações, indicando o título, a referência bibliográfica, a instituição vinculada ao primeiro autor, o ano de publicação, a revista na qual o trabalho foi publicado, e a base de dados de onde foi coletado.

Quadro 2: Compilação de publicações selecionadas

Quadro 4: Publicações de lâmpadas incandescentes

ARTIGO	TÍTULO	REFERÊNCIA	ANO
1	Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis	Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (2012)	2012
3	Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis	Weltz, Hirschler e Hilty (2011)	2011
4	Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs	Lim et. Al. (2013)	2013
6	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps	DoE (2012d)	2012
7	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part 2: LED Manufacturing and Performance	DoE (2012e)	2012
8	Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps	OSRAM (2009)	2009
9	The environmental impact of compact fluorescent lamps and incandescent lamps for australian conditions	Parson (2006)	2006
10	Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies	Quirk (2009)	2009
11	Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp	Ramroth (2008)	2008

Destes nove trabalhos, seis utilizam lâmpadas de 60 watts, dois utilizam lâmpadas de 100 watts, e um de 40 watts, conforme apresentado no Quadro 5. A Figura 12 apresenta as porcentagens de utilização das potências de lâmpadas.

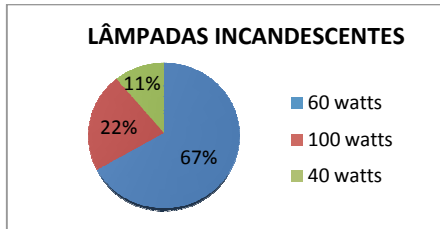


Figura 12: Potências das lâmpadas incandescentes

Quanto às fronteiras de estudo, a totalidade destes trabalhos analisa o ciclo de vida completo das lâmpadas incandescentes, avaliando desde a etapa de aquisição de matérias-primas, de produção, de uso até o pós-uso (berço ao portão).

O Quadro 5 apresenta definições importantes sobre as lâmpadas incandescentes utilizadas nos trabalhos, como a unidade funcional considerada, o fluxo de referência, o fluxo luminoso, a vida útil e a potência de cada lâmpada.

Quadro 5: Definições metodológicas das lâmpadas incandescentes

ARTIGO	UNIDADE FUNCIONAL	QUANTIDADE DE LÂMPADAS	FLUXO LUMINOSO (LUMENS)	VIDA ÚTIL (HORAS)	POTÊNCIA (Watts)
1	10.000 horas de iluminação	10	800/850	1000	60
3	1 hora de iluminação	-	-	1000	60
	50.000 horas de iluminação	50	860	1000	60
6	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	22	900	1000	60
7	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	22	900	1000	60
8	25.000 horas de iluminação	25	345/420	1000	40
9	Vida de uma CFL 18W equivalente a 10.000 horas de iluminação	1	-	2000	100
10	1.000.000 de lumens horas equivalente a 1.250 horas de iluminação	-	800	1000	60
11	10.000 horas de iluminação	1	1600	-	100

A partir do Quadro 5 é possível verificar que em relação à UF, todos os trabalhos utilizam referências similares, em função do tempo de iluminação. Para aquelas que apresentam a unidade funcional em outra ordem de grandeza, foi apresentada a respectiva equivalência às horas

de iluminação. Em função da unidade funcional, tem-se a quantidade de lâmpadas que os estudos consideraram, o que deve ser levado em conta quando os resultados de cada estudo forem apresentados e comparados.

É interessante ressaltar que a maioria dos trabalhos considerou a UF apenas o tempo de iluminação, não fazendo menção aos lumens fornecidos. Os autores Quirk (2009), DoE (2012d) e DoE (2012e) utilizaram como UF, hora de iluminação associadas à capacidade de iluminação das lâmpadas (lumens), o que aparentemente representa de forma mais completa a função do sistema de produto analisado, uma vez que os mesmos são empregados na iluminação de acordo com sua intensidade ou capacidade de fornecer luz.

O inventário do ciclo de vida muitas vezes é suprimido nas publicações, normalmente por conta de segredos industriais de produção ou mesmo por limitações de espaço exigido pelos periódicos. No entanto, muitas diferenças em resultados de ACV ocorrem em detrimento às diferenças no escopo da coleta de dados.

Dessa forma, o Quadro 6 apresenta as diferentes composições de lâmpadas apresentadas nas publicações, conforme numeração proposta pelo Quadro 2, com o intuito de serem verificadas as semelhanças e as diferentes em relação à composição das lâmpadas incandescentes utilizadas.

Quadro 6: Composição das lâmpadas incandescentes

INVENTÁRIO - COMPOSIÇÃO DA LÂMPADA INCANDESCENTE							
Artigo 7		Artigo 1		Artigo 11		Artigo 3	
Gas Argonio	0.137g	Vidro	26.05g	Cabos	0.9g	Vidro	30g
Gas Nitrogenio	0.845g	Silica	0.81g	Vidro	21.7g	Metal	3g
Gaz Oxigênio	7.290g	Tinplate	1.71g	Vidro preto	2.15g	Gases	0.1g
Gaz Hidrogênio	0.001g	Cobre	1.17g	Tungstênio	0.02g		
Amonia	0.085g	Chumbo	1.06g	Base de Metal	1.50g		
Alumínio	1.150g	Vidro escuro	3.33g				
Bronze/Latão	0.050g	Platina	0.11g				
Cola	1.550g	Cola	1.59g				
Pasta soldadora	0.150g	Argonio	0.074g				
Bulbo de Vidro	22.45g	Nitrogenio	0.004g				
Extensão de Vidro	2.097g						

Tubo de exaustão	2.166g						
Cabos	0.100g						
Molibdênio	0.013g						
Tungstênio	0.010g						
TOTAL	38,2g	TOTAL	35.91g	TOTAL	26.37g	TO-TAL	33.1g

Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012), Weltz, Hischier e Hilty (3) (2011), DoE (7) (2012e) e Ramroth (11) (2008) apresentam em suas publicações os inventários para os constituintes das lâmpadas incandescentes analisadas.

A análise do Quadro 6 permite identificar que há discrepâncias tanto nos materiais que cada artigo considera no inventário das lâmpadas, como nas quantidades de cada tipo de material, todavia, as massas totais apresentam uma mesma ordem de grandeza. É importante ressaltar também que quanto mais completo um inventário for, ele tende a representar maiores impactos devido ao maior entendimento e rigor do próprio inventário.

Em relação às categorias de impacto analisadas para as lâmpadas incandescentes, aquecimento global é a mais representativa, sendo utilizada por sete dos nove trabalhos, seguida por depleção de recursos abióticos, toxicidade humana, eutrofização, acidificação, e consumo de energia primária, todas estas sendo utilizadas em quatro dos nove trabalhos. As demais categorias, como ecotoxicidade marinha, de água doce e terrestre, uso do solo, radiação ionizantes, dentre outras, foram pouco utilizadas para estas lâmpadas.

A preferência pela categoria de impacto Aquecimento Global é um comportamento recorrente em estudos de ACV, independente do sistema de produto avaliado, pelo motivo de representar um maior interesse da comunidade científica e da sociedade. Valores em carbono são mais facilmente compreendidos por estes atores.

A Figura 13 apresenta a distribuição das principais categorias de impacto para as lâmpadas incandescentes.

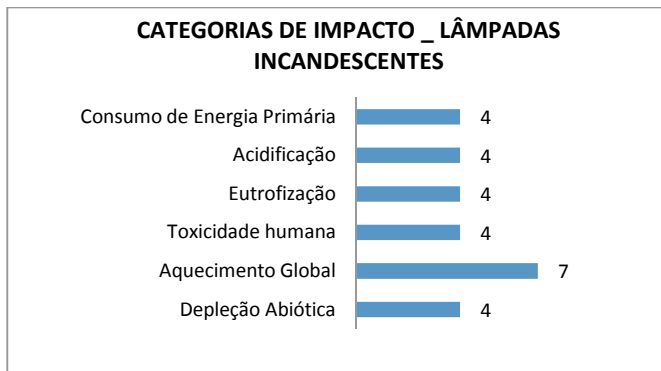


Figura 13: Categorias de impacto das lâmpadas incandescentes

Parson (2006) não apresenta valores para nenhuma categoria de impacto referente às lâmpadas incandescentes, logo será citado para as conclusões de acordo com o conteúdo da sua publicação.

O estudo de Lim et. Al. (2013) consiste em uma análise de impactos causados pela presença de metais nas lâmpadas, logo seus resultados fornecem quais os metais que são mais representativos para cada uma das categorias de impacto analisadas: depleção de recursos abióticos, toxicidade humana e ecotoxicidade para água doce. No caso das lâmpadas incandescentes, o Quadro 7 apresenta quais as quatro principais substâncias responsáveis pelos impactos, em ordem decrescente de magnitude, o que pode auxiliar no entendimento da categoria de depleção abiótica neste presente TCC.

Quadro 7: Análise dos impactos de metais para lâmpadas incandescentes

LÂMPADAS INCANDESCENTES		
Depleção de Recursos Abióticos	Toxicidade Humana	Ecotoxicidade de Água Doce
Prata	Zinco	Cobre
Tungstênio	Prata	Zinco
Zinco	Mercúrio	Prata
Cobre	Chumbo	Níquel

4.2.1. Impactos ambientais

A partir dos valores de impactos fornecidos nas publicações para as categorias de impacto, e das representações gráficas e quadros já

apresentados, será realizada uma breve discussão quanto aos resultados para as quatro principais categorias de impacto: aquecimento global, depleção abiótica, eutrofização e acidificação. Somente consideraram-se nessa avaliação os trabalhos que forneceram resultados numéricos às categorias de impacto.

Optou-se pelo aprofundamento nestas categorias de impacto por representarem a maioria dos estudos levantados. Optou-se pelo não aprofundamento da categoria toxicidade humana em virtude de a mesma representar indicadores de difícil comunicação, além de um modelo de caracterização mais incerto.

- **DEPLEÇÃO ABIÓTICA**

Das quatro publicações que abordam esta categoria de impacto para as lâmpadas incandescentes, três apresentam resultados numéricos, os quais são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8: Depleção abiótica para lâmpadas incandescentes

DEPLEÇÃO ABIÓTICA (kg de Sb Equivalente)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.0473	0.008
USO	-	3.7705	1.148
TRANSPORTE	-	0.001	-
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.0007	-
TOTAL	0.0013	3.8195	1.15

Esta categoria de impacto trata da diminuição dos recursos naturais. A partir dos valores obtidos por OSRAM (8) (2009) e DoE (7) (2012e) é possível identificar que a fase do ciclo de vida das lâmpadas incandescentes que gera uma maior diminuição de recursos naturais é a fase de uso, devido principalmente ao grande gasto energético direto associado à lâmpada e indiretamente envolvido no processo de geração da própria eletricidade .

Dos inventários de uso, DoE (7) (2012e) considera um consumo energético de 90kWh para cada lâmpada, enquanto que Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) apresentam um consumo energético para esta etapa do ciclo de vida de 60kWh. Assim, em (7), um maior consumo energético provavelmente para a produção de uma intensidade maior de luz, está relacionado com um maior consumo energético e a um maior impacto quanto aos recursos naturais. OSRAM (8) (2009) não apresentou o inventário utilizado em sua publicação. Esta diferença de con-

sumo energético implica em diferentes impactos relacionados à fase de uso, o que pode justificar em partes a diferença na ordem de grandeza dos artigos 7 e 8 para o artigo 1. O artigo 7 é o único que explicita o seu consumo de tungstênio, que conforme o Quadro 7 é um dos principais influenciadores para a categoria de depleção abiótica. Esta pode ser outra justificativa para este estudo apresentar maiores impactos frente aos demais, onde não são esclarecidos seus consumos desta matéria-prima essencial para a lâmpada incandescente. Em (1), além da não consideração do consumo de tungstênio, os autores podem ter inventariado somente as diferenças das incandescentes frente às fluorescentes, dado a natureza deste estudo ser comparativa, e, portanto, pode ser outra justificativa para a grande variação neste resultado frente aos demais.

Por potência das lâmpadas e por fornecimento de intensidade (mesmo que não constando em todas as UFs) os três estudos se assemelham, havendo uma pequena variação de 10% a mais de consumo de lâmpadas para (7) (22 lâmpadas para 20000 horas, logo 1,1 lâmpadas para 1000 horas), o que de certa forma contribuiu para que este resultado fosse mais significativo que os demais.

Realizou-se uma rápida análise comparativa de fontes energéticas existentes no banco de dados no SimaPro, através do método Ecoindicador 99, para a produção de 100 kWh (cada) como base em tecnologias e realidades europeias, conforme Quadro 9: Comparativo de fontes energéticas, com valores relativizados à soma de energia produzida (600 kWh). Desta maneira é possível identificar as matrizes Eólica, a Óleo e a Gás natural como principais geradoras de impacto para a depleção de recursos abióticos. Em contrapartida, matrizes Hidrelétricas e Nucleares representam pouco impacto para esta categoria.

Quadro 9: Comparativo de fontes energéticas para Depleção Abiótica

Energias (Ecoindicador 99)						
Categoria	Nuclear (CH U)	Hidrelétrica (CH U)	Eólica (CH U)	Gás Natural (DE U)	Carvão (DE U)	Óleo (DE U)
Minerais	8%	5%	72%	2%	5%	8%
Combustíveis Fósseis	0%	0%	0%	38%	5%	56%

Desta forma, embora não seja evidente qual é a fonte energética utilizada em cada artigo, e podemos apenas tecer conjecturas a respeito dos países de origem de cada (os artigos 1 e 7 utilizam a européia, enquanto que o artigo 8 emprega a matriz americana) a grande variação de (1) frente à (7) e (8) pode estar associada a fonte de energia empregada naquele sistema (i.e. majoritariamente nuclear ou hidrelétrica), enquanto que (7) e (8) podem empregar matriz eólica ou a óleo ou a gás.

A variação entre métodos de AICV representa também uma potencial fonte de diferença entre os artigos. Realizando a mesma avaliação do Quadro 9: Comparativo de fontes energéticas por meio do método CML 2001, encontramos um comportamento bem diferente, sendo atribuído, por exemplo, somente 1% de impactos à matriz eólica.

Possivelmente, esta dificuldade comparativa seria amenizada se a UF fosse mais completa, contemplado a relação de intensidade de luz e não somente o tempo de iluminação, além da apresentação de inventários completos e maior rigor na descrição do escopo de cada estudo.

- **AQUECIMENTO GLOBAL**

A categoria de impacto aquecimento global foi abordada por sete publicações, das quais seis apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10: Aquecimento global para lâmpadas incandescentes

AQUECIMENTO GLOBAL (kg de CO ₂ equivalentes)						
Artigo	1	3	7	8	10	11
MANUFATURA	7.23	-	7.025	1.4	<1%	-
TRANSPORTE	-	-	0.14	-	-	-
USO	3868.70	-	508.56	225.6	99%	-
DISPOSIÇÃO FINAL	0.11	-	0.095	-	-	-
TOTAL	3876.03	360	515.82	227	-	733.52

Os resultados do Quadro acima mostram novamente a predominância da fase de uso nos estudos (1), (7), (8) e (10), com valores acima de 95% em participação dos impactos. A etapa de manufatura das lâmpadas incandescentes é responsável por apenas uma pequena parcela de emissões de gases de efeito estufa, assim como a fase de disposição final é responsável por uma parcela ínfima do valor total das emissões.

Assim, como o gargalo do sistema se confirma novamente para a fase de uso, o artigo (1) é o único que destoa dos demais em termos de grandeza de seus resultados finais, embora percentualmente, por etapas, ele seja equivalente.

A fase de uso é mais representativa quanto às emissões de GEE devido à novamente estar associado a um alto consumo de energia, que naturalmente está ligada à sua geração e transmissão. Assim como Quirk (10) (2009), OSRAM (8) (2009) e Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) também apresentam a relação de 99% dos GEE estarem associados à esta fase, sendo que DoE (7) (2012e) apresentou a relação de

98%. Desta forma, torna-se visível que a fase de uso realmente é a mais representativa para a emissão de GEE para as lâmpadas incandescentes.

Conforme apresentado anteriormente, DoE (7) (2012e) considera um consumo energético da fase de uso de 90kWh, Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) 60kWh, e OSRAM (8) (2009) não apresentou o inventário utilizado em sua publicação. Temos ainda que Ramroth (11) (2008) considera o impacto deste valor consumo como sendo 730 kg de CO₂ equivalentes, não fornecendo o valor do consumo em kWh, porém sendo 99% do valor total.

A diferença de consumo energético implica em diferentes impactos relacionados à fase de uso, o que pode justificar em partes a diferença na ordem de grandeza dos impactos. Novamente, a complementação de UF solucionaria esta diferença, relacionando à quantidade de lumens pelo período de iluminação. Os valores finais se aproximam em ordem de grandeza para os artigos (3), (7), (8) e (11), ficando o artigo (1) com valores em uma ordem de grandeza mais significativa.

Novamente avaliando matrizes energéticas diversas para esta categoria de impacto no Quadro 11, podemos evidenciar as fontes baseadas na queima de gás, carvão e óleo como maiores emissoras de GEE.

Quadro 11: Comparativo de fontes energéticas para Aquecimento Global

Energias (Ecoindicator 99)						
Categoria	Nuclear (CH U)	Hidrelétrica (CH U)	Eólica (CH U)	Gás Natural (DE U)	Carvão (DE U)	Óleo (DE U)
Aquecimento Global	0%	0%	1%	20%	38%	40%

É possível que o motivo para tais diferenças estejam relacionadas às matrizes energéticas empregadas, reforçando em (7) e (8) a associação frente à energia eólica (já que é grande consumidora de recursos abióticos). No entanto para (1), fontes identificadas no Quadro 9: Comparativo de fontes energéticas para Depleção Abiótica não reforçam resultados do Quadro 11. Neste caso, é possível que a fonte energética possa ser conformada por uma matriz heterogênea. Para (3) e (11), é possível assumir fontes de energia semelhantes a (7) e (8) por proximidade de grandeza dos resultados. Além disso, as possíveis variações nas intensidades de iluminação de cada estudo influenciam diretamente nos consumos energéticos.

Novamente, também é importante que sejam levadas em consideração as origens dos artigos. Ramroth (11) (2008), Quirk (10) (2009) e DoE (7) (2012e) utilizaram a matriz americana, enquanto OSRAM (8)

(2009), Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) e Weltz, Hischer e Hilty (3) (2011) utilizaram a europeia.

As variações podem ocorrer também devido a particularidades de escopo, variações dos métodos de AICV (fatores de caracterização e “acusação” de substâncias) e mesmo atualizações de banco de dados e software.

- EUTROFIZAÇÃO

A categoria de eutrofização foi abordada por quatro publicações, das quais três apresentam resultados numéricos, sendo estes apresentados no Quadro 12.

Quadro 12: Eutrofização para lâmpadas incandescentes

EUTROFIZAÇÃO (kg de PO ₄ equivalentes)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.042015	0.0004
TRANSPORTE	-	0.00026	-
USO	-	0.93494	0.0548
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.00016	-
TOTAL	0.1576	0.9733	0.0552

Os valores apresentados para esta categoria de impacto apresentam ordem de grandeza mais próxima, se comparadas com resultados de Aquecimento Global e Depleção Abiótica. Destes, os artigos (1) e (7) encontram-se mais próximos, sendo ambos para lâmpadas de 60Watts, enquanto que o artigo (8) utiliza uma lâmpada de 40Watts. Embora a diferença entre (7) e (8) seja na ordem de aproximadamente 17 vezes, seus resultados relativo em porcentagem são próximos, com 96% e 99% dos impactos atribuídos à fase de uso para (7) e (8) respectivamente, reforçando a etapa como gargalo do sistema para esta categoria de impacto, assim como as demais analisadas neste TCC.

Com relação aos impactos das matrizes energéticas, para eutrofização, os percentuais se assemelham ao Quadro 11.

O autor de (8) afirma que o transporte da fase de manufatura para a fase de uso é um grande contribuinte para os impactos de eutrofização na ACV aplicada por ele, mas não apresenta seu cenário de logística em seu inventário. Por outro lado, (7) forneceu a distância média percorrida de 1000 km para transporte rodoviário e de 10.000 km para transporte transoceânico. Os impactos do transporte (somados), avaliados pelo

mesmo método proposto por (7) com mesmo inventário representa somente 4% do total emitido, o que confronta a afirmação realizada por (8).(1) apresenta apenas a relação de 0,012 t.km, que é bastante inferior à quantidade de t.km de (7) em uma comparação direta.

A descrição e aplicação do inventário de composição da lâmpada apresentado por DoE (7) (2012e), de forma mais completa pode justificar seu valor mais expressivo à categoria de impacto.

Outro possível motivo reside nas variações metodológicas de escopo, variações dos próprios métodos de AICV e mesmo adaptações e atualizações de banco de dados e software.

- ACIDIFICAÇÃO

A categoria de impacto de acidificação também foi abordada por quatro publicações, das quais três apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 13.

Quadro 13: Acidificação para lâmpadas incandescentes

ACIDIFICAÇÃO (kg de SO ₂ equivalentes)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.48477	0.004
TRANSPORTE	-	0.00194	-
USO	-	3.46680	1.4
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.00003	-
TOTAL	0.1894	3.5039	1.404

A partir dos resultados apresentados no Quadro 13 percebe-se que a fase de uso também é a principal relacionada aos impactos de acidificação, sendo responsável por aproximadamente 99% das emissões.

OSRAM (2009) relaciona o alto consumo energético destas lâmpadas como fator principal dos altos impactos de acidificação gerados. Da mesma forma que para as categorias anteriormente analisadas, as fontes das variações entre os estudos podem estar relacionadas à diferenças de inventário quanto ao consumo de energia, bem como variações de escopo.

4.3. LÂMPADA FLUORESCENTE

Das treze publicações analisadas, onze têm como objeto de estudo as lâmpadas fluorescentes. A seguir é apresentado um quadro contendo o título, a referência e o ano dessas publicações, mantendo a numeração de acordo com o Quadro 2.

Quadro 14: Publicações de lâmpadas fluorescentes

Nº	TÍTULO	REFERÊNCIA	ANO
1	Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis	Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (2012)	2012
2	LCA of spent fluorescent lamps in Thailand at various rate of recycling	Apisitpuvakul et Al. (2008)	2008
3	Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis	Weltz, Hischer e Hilty (2011)	2011
4	Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED)Bulbs	Lim et. Al. (2013)	2013
6	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps	DoE (2012d)	2012
7	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part 2: LED Manufacturing and Performance	DoE (2012e)	2012
8	Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps	OSRAM (2009)	2009
9	The environmental impact of compact fluorescent lamps and incandescent lamps for australian conditions	Parson (2006)	2006
10	Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies	Quirk (2009)	2009
11	Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp	Ramroth (2008)	2008
12	A Case Study of Life Cycle Assessment (LCA) on Ballast for Fluorescent lamp in Malaysia	Syafa Bakri et Al. (2008)	2008

Syafa Bakri et Al. (2008) consiste em uma publicação que realiza uma ACV com o intuito de avaliar o desempenho ambiental dos lastros de uma lâmpada fluorescente, verificando qual lastro entre o magnético e o eletrônico apresenta menos impactos ambientais associado. Desta maneira, este trabalho será analisado separadamente por apresentar re-

sultados singulares. A UF considerada é de 10 anos, e o lastro é referente a uma lâmpada de 36watts.

Nos demais 10 artigos que utilizam as lâmpadas fluorescentes, verifica-se uma grande variação quanto à potência utilizada, sendo que três artigos utilizam lâmpadas de 15W, dois artigos utilizam lâmpadas de 13W, e as potências de 23W, 18W, 11W e 8W são utilizadas cada uma por um artigo, conforme apresentado no Quadro 15.

A Figura 14 apresenta as porcentagens de utilização das potências de lâmpadas incandescentes.

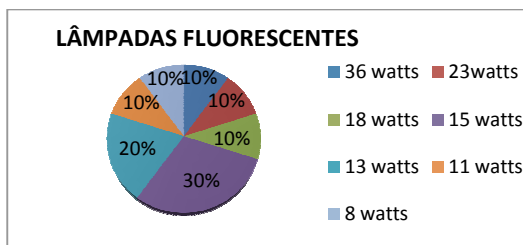


Figura 14: Potências de lâmpadas fluorescentes

Quanto às fronteiras de estudo, nove artigos analisam o ciclo de vida completo das lâmpadas fluorescentes, avaliando desde a etapa de aquisição de matérias-primas, de produção, de uso até o pós-uso (berço ao túmulo), e um artigo analisa apenas o pós-uso. A Figura 15 apresenta as porcentagens de utilização das fronteiras para as lâmpadas fluorescentes.

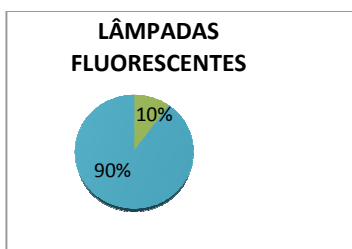


Figura 15: Fronteiras das publicações das lâmpadas fluorescentes

O Quadro 15 apresenta definições importantes sobre as lâmpadas fluorescentes utilizadas nos trabalhos, como a unidade funcional considerada, o fluxo de referência, a fim de ser possível a comparação com as demais lâmpadas, o fluxo luminoso, a vida útil e a potência de cada lâmpada:

Quadro 15: Definições metodológicas das lâmpadas fluorescentes

ARTIGO	UNIDADE FUNCIONAL	QUANTIDADE DE LÂMPADAS	FLUXO LUMINOSO (LUMENS)	VIDA UTIL (HORAS)	POTÊNCIA (Watts)
1	10.000 horas de iluminação	1	800/850	10.000	15
2	13.600 horas de iluminação	1	-	13.600	36
3	1 hora de iluminação	1	-	10.000	11
4	50.000 horas de iluminação	5	800	10.000	13
6	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	3	900	8.500	15
7	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	3	900	8.500	15
8	25.000 horas de iluminação	2,5	345/420	10.000	8
9	Vida de uma CFL 18W	1	-	8.000	18
10	1.000.000 de lumens horas equivalente a 1.250 horas de iluminação	-	800	8.000	13
11	10.000 horas de iluminação	1	1600	-	23

Em relação às unidades funcionais, a partir do Quadro 15 verifica-se que duas novas UF foram adicionadas em relação ao Quadro 5: Definições metodológicas das lâmpadas incandescentes, 13.600 horas de iluminação do artigo de Apisitpuvakul et Al. (2) (2008) e 10.000 horas de iluminação do artigo de Syafa Bakri et Al. (12) (2008), ambos considerando apenas o tempo de iluminação, sem mencionar o fluxo luminoso fornecido.

A seguir são apresentados os inventários das composições das lâmpadas fluorescentes, fornecidos em algumas das publicações em análise:

Quadro 16: Composição das lâmpadas fluorescentes

INVENTÁRIO - COMPOSIÇÃO DA LÂMPADA FLUORESCENTE									
(7)		(1)		(9)		(11)		(3)	
Gas Argonio	0.004g	Vidro	22.35g	Base de metal	1.7g	Base de metal	4.80g	Vidro	65g
Gas Nitrogenio	0.119g	Fósforo	0.95g	Cobre	0.7g	Cobre	1.90g	Metal	4g
Gas Oxigênio	0.159g	Base de metal	2.35g	Vidro escuro	6.2g	Vidro escuro	4.90g	Gases	1g
Gas Hidrogênio	0.002g	Cobre	23.57g	Tubo de vidro	35.5g	Tubo de vidro	33.7	Electronicos	15.26g
Gas Neon	0.0004g	Chumbo	1.02g	Mercúrio	0.003g	Base de plastico	16.80g	Plástico	25g
Gases nobres	0.001g	Vidro escuro	4.97g	Conjunto eletronic	26.2g	Placas de circuito interno	4.0g	Mercurio	0.004g
Óxido de Itrio	1.37g	Platina	4.36g	Cola	3.6g	Conunto do circuito	24.7g		
Amonia	0.13g	Cola	2.73g	Plástico	15.1g	Conunto do circuito	24.7g		
Acido Nítrico	7.9g	Argonio	0.017g	PET	25.7g	Espuma	3.0g		
Ácido Sulfurico	1.67g	Mercúrio	0.003g	Conjunto de eletrodos	0.5g	Conjunto de eletrodos (mercúrio)	1.6g		
Óxido de Alumínio	0.008g	PET	12.83g	Papel	5.0g				
Chumbo	0.19g	Papelão	26.03g						
Cobre	0.402g								
Níquel	0.003g								
Latão	1.65g								
Ferro fundido	0.029g								
Cromo	0.0002g								
Mercúrio	0.004g								
Termistor	0.19g								
PWB	3.7g								
Transitor de energia	3.7g								
Cola	4.5g								
Pasta soldadora	0.3g								
Tubo de vidro	11.20g								
PBTP	2.39g								
Embalagem	81g								
TOTAL	120.5g	TOTAL	105.18g	TOTAL	90.6g	TOTAL	95.4g	TOTAL	110.3g

Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012), Weltz, Hischer e Hilty (3) (2011), DoE (7) (2012e), Parson (9) (2006) e Ramroth (11) (2008) apresentam em suas publicações os inventários para os constituintes das lâmpadas fluorescentes analisadas. Os artigos (1) e (7) fazem referência a uma lâmpada de 15Watts, enquanto que o (11) a uma de 23Watts, o (3) a uma de 11Watts e o (9) a uma de 18Watts.

É importante ressaltar que há discrepâncias tanto nos materiais que cada artigo considera no inventário das lâmpadas, como nas quantidades de cada tipo de material, todavia, a massa total para todos os artigos apresenta uma mesma ordem de grandeza, embora DoE (7) (2012e) apresente um inventário muito mais completo que os demais.

Em relação às categorias de impacto analisadas para as lâmpadas fluorescentes, aquecimento global é a mais representativa, sendo utilizada por oito dos onze trabalhos, seguida por toxicidade humana utilizada em 6 trabalhos, e em seguida por depleção de recursos abióticos, eutrofização e acidificação, todas estas sendo utilizadas em cinco dos onze trabalhos. A Figura 16 apresenta a distribuição das categorias de impacto para as lâmpadas incandescentes.

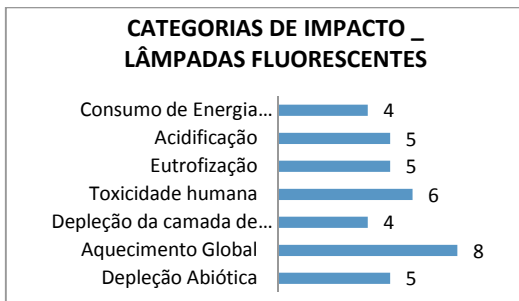


Figura 16: Categorias de impacto das lâmpadas fluorescentes

Conforme apresentado para as lâmpadas incandescentes, Lim et. Al. (2013) enumera quais as quatro principais substâncias responsáveis pelos impactos para as categorias de impacto depleção abiótica, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce para as lâmpadas fluorescentes. O Quadro 17 apresenta estes resultados em ordem decrescente de magnitude.

Quadro 17: Análise de metais para lâmpadas fluorescentes

LÂMPADAS FLUORESCENTES		
Depleção de Recursos Abióticos	Toxicidade Humana	Ecotoxicidade de Água Doce
Cobre	Zinco	Cobre
Antimônio	Chumbo	Zinco
Chumbo	Mercúrio	Prata
Zinco	Cobre	Níquel

4.3.1. Impactos ambientais

Assim como realizado para as lâmpadas incandescentes, a partir dos valores de impactos fornecidos nas publicações para as categorias de impacto, e das representações gráficas e quadros já apresentados, será realizada uma breve discussão quanto aos resultados para as quatro principais categorias de impacto: aquecimento global, depleção abiótica, eutrofização e acidificação. Somente consideraram-se nessa avaliação os trabalhos que forneceram resultados numéricos às categorias de impacto.

- DEPLEÇÃO ABIÓTICA

A categoria de impacto de depleção de recursos abióticos foi abordada por quatro publicações, das quais três apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18: Depleção abiótica para lâmpadas fluorescentes

Depleção de Recursos Abióticos (kg de Sb Equivalente)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.084805	0.0052
USO	-	1.02824	0.228
TRANSPORTE	-	0.000605	-
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.000315	-
TOTAL	0.0002	1.113965	0.2332

A partir dos valores obtidos por (8) e (7) é possível identificar que a fase do ciclo de vida das lâmpadas fluorescente que gera uma maior diminuição de recursos naturais é, assim como para as incandescentes, a fase de uso, devido principalmente ao consumo energético. No

entanto, a participação da fase de uso já apresenta um decaimento se comparado a divisão por etapas das lâmpadas incandescentes, com (7) e (8) representando 91% e 97% dos impactos respectivamente para esta fase.

Conforme analisado para as lâmpadas incandescentes, dos inventários de uso, (7) considera um consumo energético de 120kWh, enquanto que (1) 130kWh. (8) não apresentou o inventário utilizado em sua publicação. Considerando que os valores utilizados sejam próximos, não justificam diretamente a diferença de valores de impacto obtida. Por outro lado, os artigos (1) e (7) utilizam lâmpadas de 15watts, enquanto que (8) de 8 watts, o que pode influenciar nos resultados devido às necessidade de suprir quantidades diferentes de lumens.

Syafa Bakri et Al. (2008) apresentou uma comparação de impactos ambientais em relação ao lastro das lâmpadas fluorescentes. Para a categoria de impacto depleção de recursos, ele encontrou que os valores de emissões dos lastros eletrônicos correspondem a apenas 40% dos valores correspondentes aos lastros magnéticos. Logo, o tipo de lastro considerado em cada lâmpada influencia os valores obtidos para a categoria de impacto. (8) e (7) utilizam lastro eletrônico, enquanto que (1) não especifica o lastro.

Parson (2006) complementa que para a categoria depleção abiótica o lastro é responsável por cerca de 90% dos impactos gerados. Ele explica que a principal razão consiste na grande quantidade de eletrônicos presentes neste componente. Se analisarmos o Quadro 16: Composição das lâmpadas fluorescentes, (7) apresenta uma quantidade mais significativa de eletrônicos e metais do que o inventário do artigo (1), o que pode indicar uma diminuição nos resultados do artigo (1) em relação aos demais.

Ademais, as variações já expostas para as lâmpadas incandescentes com relação às matrizes energéticas e consumos de energia podem ser associadas também às fluorescentes.

- **AQUECIMENTO GLOBAL**

A categoria de impacto aquecimento global foi abordada por oito publicações, das quais seis apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 19.

Quadro 19: Aquecimento global para lâmpadas fluorescentes

AQUECIMENTO GLOBAL (kg de CO2 equivalentes)						
Artigo	1	3	7	8	10	11
MANUFATURA	5.8	-	13.62	0.88	12 A 29%	-
USO	838.21	-	138.69	45.2	-	-
TRANSPORTE	-	-	0.0865	-	-	-
DISPOSIÇÃO FINAL	72.96	-	0.043	-	-	-
TOTAL	916.97	70	152.4395	46.08	-	184

Os resultados mostram a predominância da fase de uso, sendo a principal fonte de impactos o consumo de energia, que varia conforme o lastro, o qual sofre influências da placa de circuito impressa das lâmpadas. Syafa Bakri et Al. (2008) explicam que o funcionamento da lâmpada fluorescente depende de um lastro, o qual tem o controle da geração de luz, suportando a potência da lâmpada. Os autores apresentam que o consumo energético mensal de um lastro magnético é de aproximadamente 4300 kWh, e o de um lastro eletrônico 4000 kWh, ambos de grandeza significativa e responsáveis por emissões de GEE.

Assim como para as lâmpadas incandescentes, é importante que sejam compradas as matrizes energéticas utilizadas nos artigos. Para esta categoria de impacto, foram as mesmas publicações que forneceram valores de resultados, sendo que Ramroth (11) (2008), Quirk (10) (2009) e DoE (7) (2012e) utilizaram a matriz americana, enquanto OSRAM (8) (2009), Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) e Wertz, Hischier e Hilty (3) (2011) utilizaram a europeia. Assim, apesar de não especificadas em inventários de forma a permitir a identificação das fontes de variação de forma mais concreta, novamente é possível concluir que é nesta etapa, a justificativa para os resultados diferentes.

Os valores finais para os artigos (8), (3), (7) e (11) seguem uma ordem de crescimento de acordo com as potências das lâmpadas, as quais são respectivamente 8W, 11W, 15W e 23W, e podem justificar em parte as variações nos resultados finais. O artigo (1) apresenta valores em uma ordem de grandeza mais significativa, embora seja uma lâmpada de 15watts, podendo ser devido ao método de AICV utilizado, tendo em vista que cada uma destas publicações utilizou um método diferente, ou mesmo devido aos dados de entrada utilizados na ACV.

Quirk (10) (2009) não apresentou valores, apenas a relação de que a etapa de manufatura é responsável por 12 a 29% das emissões de GEE para as lâmpadas fluorescentes. Contudo, esta relação não ocorre

para os demais artigos, cujas relações são de <1%, 9% para (1) e (7) respectivamente.

Apisitpuvakul et Al. (2008) compara as taxas de reciclagem com os impactos gerados e evitados relacionados ao sistema de produto. Para o caso da categoria aquecimento global, bastante expressiva durante todo o ciclo de vida das lâmpadas, os autores apresentam que uma reciclagem de 100% de uma lâmpada fluorescente reduziria os impactos em até 86%.

- EUTROFIZAÇÃO

A categoria de impacto eutrofização foi abordada por cinco publicações, sendo que três apresentam resultados numéricos. Os resultados obtidos por cada uma são apresentados no quadro a seguir:

Quadro 20: Eutrofização para lâmpadas fluorescentes

EUTROFIZAÇÃO (kg de PO ₄ equivalentes)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.07144	0.00024
TRANSPORTE	-	0.253575	-
USO	-	0.00016	0.0108
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.00007	-
TOTAL	0.0526	0.325245	0.01104

Os valores apresentados para esta categoria de impacto são bastante próximos para os artigos (1) e (8), sendo uma lâmpada de 15watts e uma de 8 watts respectivamente, enquanto que o artigo (7), também de 15watts apresenta um impacto maior em relação as demais.

Percentualmente a etapa de uso permanece como gargalo do sistema, representando 78% e 97% dos impactos para eutrofização para (7) e (8) respectivamente. Novamente esta afirmação esta ligada ao consumo energético e matriz energética de cada sistema de produto. Desta forma, as mesmas considerações acerca da energia realizadas para as lâmpadas incandescentes podem ser associadas às fluorescentes.

Conforme analisado para as incandescentes, OSRAM (2009) afirma que o transporte da fase de manufatura para a fase de uso é um grande contribuinte para os impactos de eutrofização. DoE (7) (2012e) forneceu as mesmas distâncias que para as incandescentes, sendo que os demais inventários não apresentam este dado. Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) apresenta apenas a relação de 0,001 tkm. Assim,

não é possível comparar diretamente estes valores, embora, como mencionado para as incandescentes, em outros estudos que não o (8), o transporte não representa parcela significativa.

O valor apresentando por DoE (7) (2012e), mais expressivo que os demais, pode ser em parte justificado por seu inventário de composição ser mais completo que os demais.

- ACIDIFICAÇÃO

A categoria de impacto de acidificação foi abordada por cinco publicações, das quais três apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 21.

Quadro 21: Acidificação para lâmpadas fluorescentes

ACIDIFICAÇÃO (kg de SO ₂ equivalentes)			
Artigo	1	7	8
MANUFATURA	-	0.17837	0.0048
TRANSPORTE	-	0.001185	-
USO	-	0.945475	0.028
DISPOSIÇÃO FINAL	-	0.000145	-
TOTAL	0.0429	1.135175	0.02848

A partir dos resultados apresentados no Quadro 21 percebe-se que a fase de uso permanece como a principal geradora de impacto, seguida da fase de manufatura. A relação com a fase de uso é influenciada pelo consumo de energia, principalmente pelos diferentes lastros das lâmpadas fluorescentes.

As ordens de grandeza dos três estudos são semelhantes à categoria de Eutrofização

OSRAM (8) (2009) e Balciukevičiūtė, Elijošiūtė e Denafas (1) (2012) apresentam valores bastante próximos para a categoria de impacto acidificação, enquanto que DoE (7) (2012e) apresentou um valor muito mais expressivo. Além das questões já abordadas devido as variações em consumos de energia, o inventário apresentando para o artigo (7) é mais completo e detalhado que os demais. Esta diferença de valores obtida pode ter relação com as quantidades de materiais utilizados, como também com as substâncias específicas consideradas em cada inventário. Como exemplo tem-se o Ácido nítrico, presente apenas no inventário de DoE (7) (2012e).

4.4. LÂMPADA DE LED

Das treze publicações analisadas, sete têm como objeto de estudo as lâmpadas de LED. A seguir é apresentado um quadro contendo o título, a referência e o ano dessas publicações, mantendo a numeração de acordo com o Quadro 22.

Quadro 22: Publicações de lâmpadas de LED

Nº	TÍTULO	REFERÊNCIA	ANO
4	Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs	Lim et. Al. (2012)	2012
5	Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire—a case study	Tähkämö et Al. (2013)	2013
6	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps	DoE (2012d)	2012
7	Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products - Part 2: LED Manufacturing and Performance	DoE (2012e)	2012
8	Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps	OSRAM (2009)	2009
10	Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies	Quirk (2009)	2009
13	Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates	Hadi et Al. (2013)	2013

Destes sete trabalhos, seis diferentes potências são utilizadas, sendo que somente uma delas se repete, o que certamente prejudica as discussões dos artigos, tendo em vista a impossibilidade de comparação direta. A seguir, a Figura 17 apresenta as quantidades de cada potência de lâmpada utilizada:

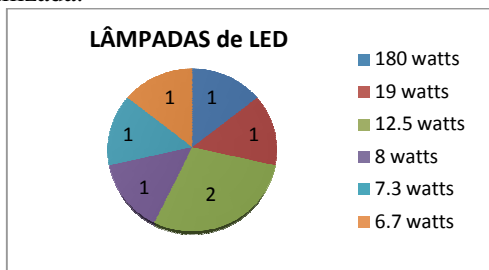


Figura 17: Potências das lâmpadas de LED

Quanto às fronteiras de estudo, seis artigos analisam o ciclo de vida completo das lâmpadas de LED, desde a etapa de aquisição de matérias-primas até o pós-uso (berço ao portão), e um artigo analisa apenas a fase de pós-uso. A Figura 18 apresenta as quantidade de utilização de cada fronteira para as lâmpadas de LED:

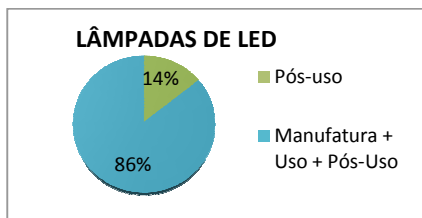


Figura 18: Fronteiras utilizadas nas publicações das lâmpadas de LED

O Quadro 23 apresenta definições importantes sobre as lâmpadas de LED utilizadas nos trabalhos, como a unidade funcional considerada, o fluxo de referência, a fim de ser possível a comparação com as demais lâmpadas, o fluxo luminoso, a vida útil e a potência de cada lâmpada.

Quadro 23: Definições metodológicas das lâmpadas de LED

ARTIGO	UNIDADE FUNCIONAL	QUANTIDADE DE LÂMPADAS	FLUXO LUMINOSO (LUMENS)	VIDA UTIL (HORAS)	POTÊNCIA (Watts)
4	50.000 horas de iluminação	1	280	50.000	7.3
5	50.000 horas de iluminação	1	-	50.000	19
6	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	1	800	25.000	12.5
7	20.000.000 de lumens horas equivalente a 22.222 horas de iluminação	1	800	25.000	12.5
8	25.000 horas de iluminação	1	345/420	25.000	8
10	1.000.000 de lumens horas equivalente a 1.250 horas de iluminação	1	300	40.000	6.7
13	10.000 horas de iluminação	1	15.000 /19.000	60.000	180

Em relação às unidades funcionais, verifica-se que todas são em função do tempo de iluminação, variando de 10.000 a 1.000.000 de

horas de iluminação, não fazendo menção a quantidade de lumens relacionada. Os períodos de vida útil encontram-se de 25.000 a 60.000 horas de iluminação, dependendo da potência e da intensidade da lâmpada.

A fim de facilitar as comparações, a seguir são apresentados os inventários de composições do ciclo de vida fornecidos em alguns dos artigos analisados, mostrando os principais constituintes das lâmpadas de LED.

Quadro 24: Composição das lâmpadas de LED

INVENTÁRIO - COMPOSIÇÃO DA LÂMPADA DE LED					
(7)		(5)		(13)	
LEDs	21g	LEDs	28g	Base	140g
Fósforo remoto	1.0g	Silicone	3.74g	Lastro	310g
Fósforo plástico	11.1g	Alumínio	23g	Lampada	30g
Alumínio dissipador de calor	68.2g	Conectores	5g	Lente	30g
Cobre	5.0g	Fósforo remoto	7.4g	Embalagem	3g
Níquel	0.003g	Aço	17g		
Latão	1.65g	Plástico	26g		
Ferro fundido	4.0g	Cabo	7g		
Cromo	0.002g	Papel	3g		
IC chip	2.0g	Diodos	0.6g		
Placa de circuito impresso	15.0g	Driver	79.6g		
Cola	4.5g				
Pasta soldadora	0.3g				
Embalagem	37g				
TOTAL	170.75g	TOTAL	200.34g	Total	520g

DoE (7) (2012e), Tähkämö et Al.(5)(2013)e Hadi et Al. (13) (2013) apresentam os inventários utilizados para as lâmpadas de LED, sendo que os dois primeiros apresentam valores totais próximos, enquanto que o terceiro, referente ao artigo 13, apresenta um total mais elevado. É válido ressaltar que o inventário do artigo (7) é para uma lâmpada de 12,5watts enquanto que o do artigo (5) para uma de 19watts, e o (13) para uma de 180watts, o que justifica as diferenças de quantidades encontradas. Além disso, evidenciam-se diferenças de materiais, as quais ocorrem devido a considerações de produtos e processos feitas pelos autores dos artigos.

Em relação às categorias de impacto analisadas para as lâmpadas de LED, aquecimento global e depleção abiótica são as mais representativas, estando toxicidade humana, eutrofização e acidificação em seguida. A Figura 19 apresenta a porcentagem de distribuição das principais categorias de impacto para as lâmpadas de LED.

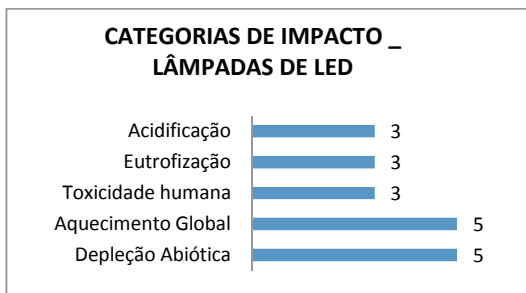


Figura 19: Categorias de impacto para as lâmpadas de LED

Conforme apresentado para as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, Lim et. Al. (2013) apresenta quais as quatro principais substâncias responsáveis pelos impactos para as categorias de impacto depleção abiótica, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce para as lâmpadas de LED. O Quadro 25 apresenta estes resultados em ordem decrescente de magnitude.

Quadro 25: Análise de metais para lâmpadas de LED

LÂMPADAS DE LED		
Depleção de Recursos Abióticos	Toxicidade Humana	Ecotoxicidade de Água Doce
Prata	Zinco	Cobre
Ouro	Prata	Zinco
Antimônio	Cobre	Prata
Cobre	Mercúrio	Níquel

4.4.1. Impactos ambientais

Assim como realizado para as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, a partir dos valores de impactos fornecidos nas publicações para as categorias de impacto, e das representações gráficas e quadros já apresentados, será realizada uma breve discussão quanto aos resultados para as quatro principais categorias de impacto: aquecimento global,

depleção abiótica, eutrofização e acidificação. Somente consideraram-se nessa avaliação os trabalhos que forneceram resultados numéricos às categorias de impacto.

- **DEPLEÇÃO ABIÓTICA**

Embora cinco publicações considerem a categoria de impacto de depleção abiótica, apenas duas apresentam resultados numéricos, os quais são apresentados no Quadro 26.

Quadro 26: Depleção abiótica para lâmpadas de LED

DEPLEÇÃO DE RECURSOS ABIÓTICOS (kg de Sb Equivalente)		
Artigo	7	8
MANUFATURA	0.054605	0.0052
USO	0.870235	0.228
TRANSPORTE	0.00018	-
DISPOSIÇÃO FINAL	0.000055	-
TOTAL	0.925075	0.2332

A partir dos valores obtidos por OSRAM (8) (2009) e DoE (7) (2012e) é possível identificar que a fase do ciclo de vida das lâmpadas de LED que gera uma maior diminuição de recursos naturais é a fase de uso, devido principalmente ao consumo energético, tal qual as demais lâmpadas.

Conforme analisado para as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, dos inventários de uso, DoE (7) (2012e) considera um consumo energético de 312.5kWh. OSRAM (8) (2009) não apresentou o inventário utilizado em sua publicação. Além disso, o artigo (7) utiliza uma lâmpada de 12.5watts, enquanto que (8) de 8watts. Desta forma, embora para as lâmpadas de LED, a grande diferença de grandeza não ocorra, a possibilidade de fornecer maior intensidade luminosa pela lâmpada de (7) pode estar associada a um maior consumo energético que do que (8), o que justificaria a variação dos resultados, e automaticamente refletindo no resultado final conforme possibilidades de variação mencionado nos consumos das incandescentes e fluorescentes.

Lim et. Al. (2013) mostrou em seu estudo quais os principais metais envolvidos nos impactos desta categoria para as lâmpadas de LED, podendo haver relação entre o inventário mais extenso e completo de DoE (7) (2012e) com seu resultado mais expressivo, conforme pode-se visualizar na participação da manufatura no Quadro 26: Depleção abiótica para lâmpadas de LED.

- AQUECIMENTO GLOBAL

A categoria de impacto aquecimento global foi abordada por cinco publicações, das quais quatro apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no quadro 27.

Quadro 27: Aquecimento global para lâmpada de LED

AQUECIMENTO GLOBAL (kg de CO2 equivalentes)				
Artigo	7	8	10	13
MANUFATURA	8.101	0.96	17 a 24%	141.67
USO	117.378	45.2	-	408.33
TRANSPORTE	0.026	-	-	-
DISPOSIÇÃO FINAL	0.0075	-	-	-
TOTAL	125.5125	46.16	-	550

Os resultados mantém a predominância da fase de uso devido aos processos envolvidos no consumo de energia.

Quirk (10) (2009) não apresentou valores, apenas a relação de que a etapa de manufatura é responsável por 17 a 24% das emissões de GEE para as lâmpadas de LED, sendo que esta relação é de 7% para DoE (7) (2012e), 2% para OSRAM (8) (2009) e 25% para Hadi et Al. (13) (2013). Estas variações na etapa de manufatura estão ligadas às diferenças na constituição (e tamanho) de cada lâmpada.

Com relação aos consumos de energia, Quirk (10) (2009), DoE (7) (2012e) e Hadi et Al. (13) (2013) utilizaram a matriz americana, enquanto OSRAM (8) (2009) a europeia. Esta variação, somada às questões já mencionadas com relação as fonte energéticas e diferenças nas potências das lâmpadas podem justificar a diferença dos valores finais para esta categoria de impacto.

Outro ponto que pode influenciar nos diferentes resultados consiste no método de AICV utilizado por cada autor, uma vez que Quirk (10) (2009) e DoE (7) (2012e) não informaram os métodos utilizados, OSRAM (8) (2009) utilizou o CML 2000 e Hadi et Al. (13) (2013) o ECO INDICATOR 99.

- EUTROFIZAÇÃO

Três publicações abordaram a categoria de impacto de eutrofização, porém somente dois apresentaram resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 28.

Quadro 28: Eutrofização para lâmpada de LED

EUTROFIZAÇÃO (kg de PO ₄ equivalentes)		
Artigo	7	8
MANUFATURA	0.049925	0.00032
TRANSPORTE	0.21461	0.0108
USO	0.00005	-
DISPOSIÇÃO FINAL	0.00001	-
TOTAL	0.264595	0.01112

De acordo com os autores de (8), para as lâmpadas de LED, os grandes envolvidos nos impactos relacionados à eutrofização na fase de manufatura são os produtos químicos presentes nos resíduos gerados nos processos iniciais da produção destas lâmpadas.

Os resultados demonstram a fase de uso como gargalo do sistema, mantendo percentuais apresentados para as outras categorias de impacto, 80% e 97% para (7) e (8) respectivamente.

As diferenças podem ser justificadas pelas variações de escopo de cada estudo, incluindo diferentes métodos de AICV empregados, além das questões já explicitadas vinculadas aos consumos de energia e diferentes matrizes energéticas.

- ACIDIFICAÇÃO

A categoria de impacto de acidificação foi abordada por três publicações, das quais duas apresentam resultados numéricos. Estes resultados são apresentados no Quadro 29.

Quadro 29: Acidificação para lâmpada de LED

ACIDIFICAÇÃO (kg de SO ₂ equivalentes)		
Artigo	7	8
MANUFATURA	0.075003	0.0068
TRANSPORTE	0.8001875	0.28
USO	0.000354	-
DISPOSIÇÃO FINAL	0.0000295	-
TOTAL	0.875574	0.2868

A partir dos resultados apresentados no Quadro 29 percebe-se que a fase de uso também é a principal relacionada aos impactos de acidificação, por conta do consumo de energia, porém para as lâmpadas de LED a fase de manufatura passa a ser mais representativa do que para as demais lâmpadas, tendo em vista os componentes como o alumínio dissipador de calor e os metais, assim como a melhor eficiência das próprias lâmpadas. De acordo com Lim et. Al. (2013), a concentração de alumínio da lâmpada de LED é aproximadamente 95% maior que as concentrações de alumínio das demais lâmpadas.

DoE (7) (2012e) apresenta que a fase de manufatura é responsável por aproximadamente 16.8% dos impactos, associada principalmente às matérias-primas, aos LEDs e ao alumínio dissipador de calor. Em seu inventário ele mostra que 40% da massa da lâmpada corresponde ao dissipador de calor.

Ambos os resultados encontram-se na mesma ordem de grandeza, e é fundamental considerar que são correspondentes a lâmpadas de potências diferentes. Todavia, DoE (7) (2012e) apresentou um valor maior, o qual pode ser justificado pelo inventário apresentando para o artigo (7) ser mais completo e detalhado que os demais.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS TRÊS LÂMPADAS

A partir das análises realizadas para cada lâmpada, é possível que seja feita uma análise geral que confronte as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED.

Do ponto de vista de consumo energético, pode-se afirmar que as lâmpadas incandescentes consomem uma maior quantidade de energia, associada à fase de uso, devido à sua baixa eficiência se comparada às demais tecnologias. De acordo com Quirk (2009), as lâmpadas fluorescentes e de LED produzem iluminação quatro vezes mais eficiente do que as lâmpadas incandescentes convencionais durante a sua fase de uso. Aman et Al. (2013) afirma que durante a fase de uso, o consumo energético das lâmpadas incandescentes é de aproximadamente 3300kWh, enquanto que para as fluorescentes e lâmpadas de LED de 700kWh.

Contudo, tomando como base a fase de manufatura, as lâmpadas incandescentes emitem uma porcentagem muito menor de GEE em relação à totalidade de emissões do ciclo de vida. Isto pode ser explicado pelo fato das lâmpadas fluorescentes e de LED apresentarem matérias-primas mais diversas e processos produtivos mais complexos, que utilizam mais energia fóssil primária, em relação ao processo produtivo

das incandescentes, o qual é bastante simples (QUIRK, 2009). O autor complementa que, por bulbo, as lâmpadas fluorescentes requerem cerca de 30 vezes mais energia primária fóssil para serem produzidas do que as incandescentes, enquanto que as de LED requerem 2 vezes mais que as lâmpadas fluorescentes.

Considerando os processos de disposição final, as lâmpadas incandescentes são totalmente recicláveis, enquanto que as lâmpadas fluorescentes e de LED apresentam em sua composição inúmeros metais e substâncias com potencial tóxico, necessitando assim de técnicas específicas para separação de materiais, o que encarece os processos de reciclagem assim como aumentam os impactos associados a esta fase do ciclo de vida em específico. Segundo Lim et. Al. (2013) a quantidade de metais e componentes com impactos à saúde humana e aos ecossistemas presentes nos resíduos das lâmpadas fluorescentes e de LED é superior às incandescentes, por conta da quantidade destes componentes nos processos produtivos destas lâmpadas.

Para efeito de comparação dos três tipos de lâmpadas em relação às categorias de impacto analisadas, foram escolhidos os resultados apresentados por DoE (2012e) para serem utilizados graficamente, por preencherem todas as categorias para todas as lâmpadas, e por este artigo ser bastante completo, apresentando inventários detalhados e concisos para cada lâmpada.

Assim, a Figura 20 apresenta a variação das três lâmpadas para as categorias de impacto de depleção abiótica, eutrofização e acidificação, enquanto que a Figura 21 apresenta os resultados para a categoria de impacto aquecimento global, a qual foi apresentada separadamente tendo em vista a diferença de grandeza dos resultados.

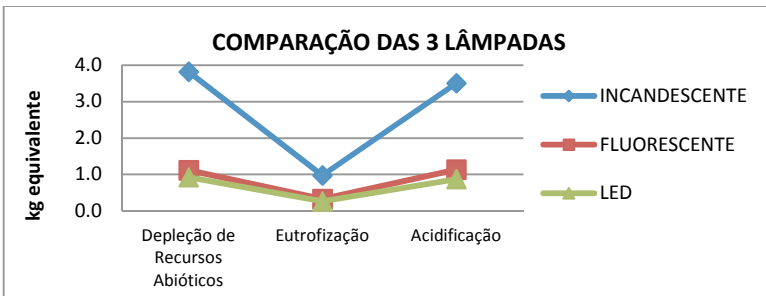


Figura 20: Comportamento das três lâmpadas para depleção abiótica, eutrofização e acidificação (adaptado de DoE, 2012e)

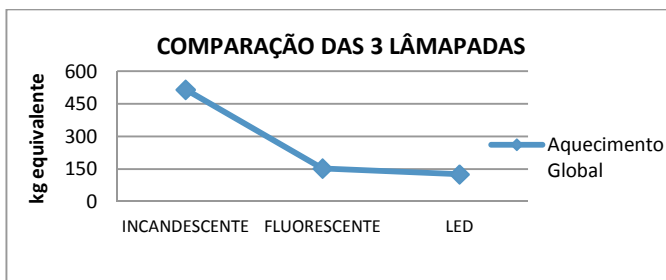


Figura 21: Comportamento das três lâmpadas para aquecimento global (adaptado de DoE, 2012e)

A partir das representações gráficas apresentadas, conclui-se que as lâmpadas incandescentes apresentam um desempenho mais impactante ao meio ambiente para as categorias avaliadas, pois em todas, esta lâmpada apresentou as maiores contribuições e emissões, o que se deve principalmente ao alto consumo energético que estas lâmpadas necessitam para o processo de geração de luz.

Desta maneira, a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes ou de LED é uma alternativa que tende a minimizar os impactos ambientais associados à iluminação.

5. CONCLUSÕES

Diante da revisão integrativa apresentada, conclui-se primeiramente que são poucos os estudos de ACV publicados que utilizam como sistema de produtos as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED, mesmo com a crescente preocupação com a questão energética, como também com a sustentabilidade de produtos e serviços, através da qual se busca minimizar os impactos ambientais associados.

Em suma, este TCC verificou que as unidades metodológicas utilizadas para a realização de uma ACV influenciam de maneira considerável nos resultados obtidos, além de, em certos casos, restringir e por vezes impossibilitar as possibilidades de comparação, podendo induzir a uma conclusão que nem sempre é a verdadeira. Como exemplo, as unidades funcionais consideradas por grande parte das publicações selecionadas não faziam menção a uma quantidade de lumens exata, considerando apenas o tempo de iluminação, sendo que quanto mais específicas as unidades funcionais, mais exatos são os resultados da ACV em comparações, logo mais concisos e confiáveis.

Além disso, os resultados apresentados evidenciam a dificuldade em se traçar padrões para estes estudos, uma vez que a variabilidade de definições metodológicas e de dados de entrada dos sistemas de produto permite que cada autor expresse seus resultados da maneira que lhe convém, dificultando as comparações. Esta afirmação deve ser considerada, por exemplo, em termos de rotulagens ambientais, as quais devem se basear em um mesmo padrão metodológico, como as regras de categoria de produto.

Outro ponto crítico encontrado está relacionado à falta de completeza dos inventários, tampouco dos resultados numéricos, gerando incertezas nas discussões finais.

Com relação às escolhas metodológicas, é importante salientar que as mesmas desempenham um papel fundamental quanto à certeza dos resultados, de forma que quanto mais completo e preciso for a sua descrição, mais exatos e confiáveis serão futuras comparações, possibilitando inclusive replicações e reproduções.

Todavia as dificuldades comparativas encontradas, a compilação dos estudos que atenderam aos requisitos desta revisão integrativa mostrou que a substituição de lâmpadas menos eficientes (incandescentes) por lâmpadas com melhor desempenho energético (fluorescentes e LEDs) é válida do ponto de vista ambiental, diminuindo drasticamente os impactos quanto às categorias avaliadas, contribuindo não somente

para a economia de energia, mas principalmente à diminuição de emissões de poluentes lançadas aos rios, solo e ar diariamente.

Academicamente, este TCC contribuirá para a base de dados dos estudos de ACV do CICLOG, como também para demais instituições de pesquisa. Considerando-se que nenhuma das publicações analisadas neste trabalho foi realizada por universidades ou centros de pesquisa brasileiros, acredita-se que esta contribuição será de grande valia para a pesquisa nacional, uma vez que estudos como estes devem sim ser realizados para as condições encontradas no Brasil, principalmente devido a vocação energética nacional diferir das européias e americanas

6. RECOMENDAÇÕES

Assim, recomenda-se que sejam realizadas avaliações de ciclo de vida para as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de LED a partir da situação energética brasileira, definindo-se a matriz energética utilizada, e considerando as matérias-primas e os dados de produção encontrados no país.

Sugere-se que seja utilizada como fronteira do sistema o ciclo de vida completo das lâmpadas, do berço ao portão, pois como mencionado, ganhos ambientais na fase de uso podem representar maiores impactos nas demais etapas do ciclo de vida. Também é sugerido que a UF seja definida considerando a intensidade luminosa por tempo de iluminação, de modo que sejam obtidos resultados com maior confiabilidade, e que os inventários do ciclo de vida sejam completos e concisos. Sugere-se que sejam adotadas lâmpadas com potências utilizadas em outros estudos, a fim de que as comparações sejam simplificadas. Além disso, recomenda-se a utilização do método de AICV Ecoindicator 99.

A partir dos resultados obtidos nestas futuras ACVs, é recomendado que seja verificada a coerência dos valores obtidos frente aos apresentados neste TCC, a fim de que se possa complementar ou mesmo corrigir as hipóteses apresentadas nas discussões realizadas neste estudo.

Compreende-se que se os novos trabalhos seguirem as recomendações desta revisão integrativa serão evitadas as falhas metodológicas aqui evidenciadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAN, M. M.; JASMON, G. B.; MOKHILIS, H.; BAKAR, A. H. A. **Analysis od the performance of domestic lighting lamps.** Journal of Energy Policy, v.52, p.482–500. 2013.

APISITPUVAKUL, W.; PIUMSOMBOON, P.; WATTS, D.J.; KOETSINCHAI, W.. **LCA of spent fluorescent lamps in Thailand at various rates of recycling.** Journal of Cleaner Production, v.16, p. 1046 – 1061. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, versão digital, 2009a. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:** Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, versão digital, 2009b. 46 p.

BEYEA, S. C.; NICOLL, L. H. **Writing an integrative review.** AORN Journal, Philadelphia, v. 67, n. 4, p. 877-880, Apr. 1998

BOTELHO, L.L.R.; CUNHA, C.C.de A.; MACEDO, M. **O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais.** Gestão e Sociedade. Belo Horizonte. v5, n11, p. 121-136. Maio/Agosto 2011 .

BROOME, M. E. **Integrative literature reviews for the development of concepts.** In: RODGERS,B. L.; CASTRO, A. A. Revisão sistemática e meta-análise. 2006. Disponível em: <www.metodologia.org/metal.PDF>. Acesso em 12 Abr 2014.

CHEHEBE, J. B. **Análise do ciclo de vida de produtos.** Rio de Janeiro. Ed. Qualitymark,. 1998. 120p

CHEHEBE, José Ribamar B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 104 p.

CLAUDINO, E.; TALAMINI, E.. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.1, p.77–85, 2013.

DoE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **LED Basis. Solid - State Lighting Program.** 2012a. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/sslbasics_ledbasics.html>. Acesso em 09 set 2013.

DoE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Lighting Market Characterization. Solid - State Lighting Program.** 2012b. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2010-lmc-final-jan-2012.pdfS>>. Acesso em 20 out 2013.

DoE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Multi – Year Program Plan. Solid – State Lighting Research and Development.** 2012c. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2012_web.pdfS>. Acesso em 20 out 2013.

DoE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Multi – Year Program Plan. Solid – State Lighting Research and Development.** 2012d. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products (Part1:ReviewoftheLife-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps). Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_LED_Lifecycle_Report.pdfS>. Acesso em 02 mai 2014.

DoE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Multi – Year Program Plan. Solid – State Lighting Research and Development.** 2012e. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products (Part2: LED Manufacturing and Performance). Disponível em:<http://appsl.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_led_lca-pt2.pdfS>. Acesso em 02 mai 2014.

ELC – EUROPEAN LAMP COMPANIES FEDERATION. 2008. Disponível em: <www.elcfed.org/2_lighting_composition.html>. Acesso em: 09 set 2013.

ELETROBRAS; PROCEL. Avaliação dos Resultados do Procel 2006. – ANO BASE 2005. Rio de Janeiro, 2007. 151 p.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo.** Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

ELIJOŠIUTE, E.; BALCIUKEVICIUTE, J.; DENAFAS, G.. **Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis**. Environmental Research, Engineering and Management, v. 3(61), p. 65-72. 2008.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues. **Análise de Ciclo de Vida**. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004. 80 p.

GUINÉE J. B. et al. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Characterisation and Normalisation Factors. Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001.

GRAEDEL, Thomas. E. **Streamlined life-cycle assessment**. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1998.

HADI, S.A.; AL KAABI, M.R.; AL ALI, M.O.; ARAFAT, M.A.. **Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates**. Energy for Sustainable Development, v.17, p.438–450. 2013.

HANSEN, A.P.. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos e Empreendimentos Sustentáveis**. Universidade Cidade de São Paulo. 2013.

HUNT, Robert G.; BOGUSKI, Terrie K.; WEITZ, Keith; SHARMA Aarti. Case Studies Examining LCA Streamlining Techniques. International Journal Of Life Cycle Assessment, Landsberg, v. 3, n. 1, p.79-85, 1998.

LIM, S.; KANG,D.; OGUNSEITAN, O.A.; SHOENUNG, J.M.. **Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs**. Environ. Sci. Technol, v.47, p, 1040–1047. 2013.

MARVUGLIA, A.; BENETTO, E.; REGE, S.; JURY, C.. **Modelling approaches for consequential life-cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: Critical review and proposed framework for biogas production**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, p.768–781. 2013.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C. M. **Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem**. Texto Contexto Enfermagem, Florianópolis, v. 17, n. 4, p. 758-764, out./dez. 2008.

OSRAM. **Life Cycle Assessment of Illuminants a Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps.** 2009. 24P.

PARSONS, D. **The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Austrailian Conditions.** The Environmental Engineer , v.7, n.2, p.8-15. 2006.

PHILIPS – **Relatório de Sustentabilidade Brasil.** 2012. Disponível em: <http://www.philips.com/philips1/shared/assets/br/Company_profile/Philips_RelatoriodeSustentabilidade_2011-2012.pdf>. Acesso em 02 Nov 2013.

PFEIFER, P. R. **Comparison Between Filament Lamps and Compact Fluorescent Lamps.** International Journal of LCA , p. 8-14. 1996.

QUIRK, I. **Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies.** 2009. Disponível em: <http://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2009final/QuirkI_2009.pdf>. Acesso em: 15 abr 2014.

RAMROTH, L. **Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp.** Rocky Mountain Institute. 2008. 18p.

SAYFA BAKRI, S.N.S.; RAMASAMY, R.K.; SURIF, S.. **Life cycle assessment of magnetic and electronic ballast for 36-W fluorescent lamp.** Int J Life Cycle Assess. V.15, p.837–841. 2010.

SILVA, Mauri Luiz da. **Luz, lâmpadas e iluminação.** Porto Alegre, 2002. 157p.

SILVA, Mauri Luiz da. **Iluminação- Simplificando o projeto.** Editora: Ciência Moderna Ltda. , Rio de Janeiro, 2009. 172p.

SILVA, Mauri Luiz da. **LED: a luz dos novos projetos.** Editora: Ciência Moderna Ltda. ,Rio de Janeiro, 2012. 139p.

SIMPSON, R.S.. **Lighting Control —Technology and Applications.** Focal Press. 2003. 564p.

SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. **Ciclo de vida integrada e Avaliação de Riscos de Processos Industriais.** Tarragona, Espanha: CRC Press LLC, 2004. 392 p.

SOUZA, S.R.. **Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEC, UFSC. Florianópolis, 2003.73p.

SOUZA, M.T.; SILVA, M. Dias da; CARVALHO, R.I de. **Revisão integrativa: o que é e como fazer.** Einstein, v. 8, p. 102-106, 2010.

TAHKAMO, L.; et. Al. **Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire—a case study.** Int J Life Cycle Assess, v.18, p. 1009–1018. 2013.

TOSTA, C. S. **Inserção da Análise do Ciclo de Vida no Estado da Bahia através da atuação do Órgão Ambiental.** Dissertação (Mestrado Profissional) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004. 188 p.

ZANGHELINI, G.M.; CHERUBINI, E.; GALINDRO, B.M.; SOARES, S.R.. **Percepções do Uso de Diferentes Métodos de ICV: Uma Comparação Baseada no Aquecimento Global.** In: III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, Maringá – PR – Brasil. setembro de 2012.

WELTZ, T.; HISCHIER,R.; HILTY, L.M.. **Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis.** Environmental Impact Assessment Review, v. 31, p. 334-343. 2011.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. **The integrative review: updated methodology.** Journal of Advanced Nursing, Oxford, v. 52, n. 5, p. 546-553, Dec. 2005.

WILLERS, C. D., RODRIGUES, L. B., SILVA, C. A. **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: uma Investigação nas Principais Bases Científicas Nacionais.** Produção, v. 23, n. 2, pag. 436-447, abr./jun. 2013.

WILLERS, C. D., RODRIGUES, L. B. **A Critical Evaluation of Brazilian Life Cycle Assessment Studies.** International Journal of Life Cycle Assessment, V. 19, n. 1, pag. 144-152, jan./2014.

