

**UNIVERSIDADE FEDERAL E SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**CICLO DE VIDA DAS BOBINAS EM  
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE ALUMÍNIO E COBRE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Marcio Burger Mansilha**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

**CICLO DE VIDA DAS BOBINAS EM TRANSFORMADORES  
DE DISTRIBUIÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE  
ALUMÍNIO E COBRE**

**Marcio Burger Mansilha**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), área de Concentração em Gerência de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

**Orientador: Prof. Dr. Leandro Cantorski da Rosa**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mansilha, Marcio Burger

Ciclo de vida das bobinas em transformadores de distribuição: estudo comparativo entre alumínio e cobre / Marcio Burger Mansilha.-2015.

86 f.; 30cm

Orientador: Leandro Cantorski da Rosa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2015

1. Avaliação do ciclo de vida (ACV) 2. Transformadores de distribuição 3. Bobinas de cobre 4. Bobinas de alumínio 5. Produção mais limpa I. Rosa, Leandro Cantorski da II. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Marcio Burger Mansilha. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: mbmansilha@gmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CICLO DE VIDA DAS BOBINAS EM TRANSFORMADORES DE  
DISTRIBUIÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ALUMÍNIO E  
COBRE**

elaborada por  
**Marcio Burger Mansilha**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia de Produção**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Leandro Cantorski da Rosa, Dr. (UFSM)**  
(Presidente / Orientador)

---

**Afranio Almir Righes, PhD. (UNIFRA)**

---

**Alberto Souza Schmidt, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 04 de Setembro de 2015.

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela vida e por todas as bênçãos recebidas.

Aos colegas, professores e funcionários do PPGEP da UFSM pelas conversas, atenção e amizades.

Ao meu orientador professor Dr. Leandro Cantorski da Rosa, pela paciência, orientação e amizade.

Ao professor Dr. Andreas Dittmar Weise pelas aulas e *happy hours*, a professora Dra. Roselaine Ruviaro Zanini por sua dedicação e entusiasmo. Aos Professores Dr. Ronaldo Hoffmann e Michel Brondani da Pós-Graduação da Engenharia de Processo por apoiar e permitir a utilização do laboratório para realização da pesquisa e pelas informações disponibilizadas. Ao professor Félix Alberto Farret, PhD, do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica pela suas contribuições.

A empresa Polo Electro e seus colaboradores, em especial ao engenheiro Edison Mansilha pela disponibilidade, experiência e informações.

Ao professor Carlos Eugenio Daudt, PhD pela amizade e apoio, e sua esposa Maria do Carmo Stabel Daudt por sempre ajudar principalmente com as minhas filhas.

Aos meus pais Eduardo e Tânia pelo amor e exemplo de trabalho, perseverança e otimismo. E aos meus queridos irmãos Silvia e Marcelo pela amizade e união.

A Simone Stabel Daudt pela paciência, tolerância, apoio e pela família maravilhosa que construímos juntos.

As minhas filhas amadas Julia e Sofia, obrigado pela existência, pela alegria e por serem a energia, a inspiração da minha vida.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

(Mahatma Gandhi)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Santa Maria

### **CICLO DE VIDA DAS BOBINAS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ALUMÍNIO E COBRE**

AUTOR: MARCIO BURGER MANSILHA

ORIENTADOR: LEANDRO CANTORSKI DA ROSA, DR.

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 04 de Setembro de 2015.

Esta pesquisa apresenta os resultados obtidos em uma avaliação do ciclo de vida (ACV) de bobinas manufaturadas com fios de cobre e com fios de alumínio em dois transformadores de distribuição a fim de identificar a que representa um menor impacto no meio ambiente. A pesquisa justifica-se como uma ferramenta para auxiliar as indústrias fabricantes de transformadores, concessionárias de energia e consumidores na escolha do material a ser utilizado para a fabricação de bobinas. Esta pesquisa se caracteriza como um estudo de caso, utilizando a metodologia NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009. O texto está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro introdutório, o segundo destinado à revisão bibliográfica, o terceiro à metodologia, o quarto aos resultados e, o último, às conclusões. Os principais resultados da ACV foram em termos de impactos e danos ambientais de acordo com o método de avaliação Eco-Indicador 99. Os resultados mostraram que o uso de transformadores com bobinas de alumínio gera menores impactos sobre o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Avaliação do ciclo de vida (ACV). Transformadores de distribuição. Bobinas de cobre. Bobinas de alumínio. Produção mais limpa.

## **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Santa Maria

### **LIFE CYCLE OF COILS IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS: COMPARATIVE STUDY BETWEEN ALUMINIUM AND COPPER**

**AUTHOR: MARCIO BURGER MANSILHA**

**ADVISER: LEANDRO CANTORSKI DA ROSA, DR.**

**Local and Date of Defense: Santa Maria, September 04th, 2015.**

This research shows the results obtained in a life cycle assessment (LCA) coils manufactured with copper wires and aluminum wires in two distribution transformers in order to identify which is less impact on the environment. The research is justified as a tool to assist the manufacturers of transformers industries, utilities and consumers in the choice of material to be used for the manufacture of coils. This research is characterized as a case study, using the NBR ISO 14040:2009 and 14044:2009 methodology. The text is divided into five chapters, the introductory first, second for the literature review, the third analyses the methodology, in the fourth the results are listed, and, the last, the conclusions. The main results of the LCA were in terms of impacts and environmental damage according to the assessment method Eco-Indicator 99. The results showed that the use of transformers with aluminum coils cause less impact on the environment.

**Keywords:** Life cycle assessment (LCA). Distribution transformers. Copper. Aluminum. Cleaner production.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre alumínio e o cobre no ano 2013. ....	17
Figura 2 - Estrutura do referencial teórico. ....	18
Figura 3 - Ciclo de vida do produto da extração à disposição final. ....	20
Figura 4 - Marcos históricos da ACV no Brasil. ....	22
Figura 5 - Trabalhos Acadêmicos de ACV no banco de teses da CAPES. ....	23
Figura 6 - Artigos ou citações no Google Acadêmico - "avaliação do ciclo de vida". ....	23
Figura 7 - Identificação dos componentes do transformador 75 kVA. ....	28
Figura 8 - Componentes de uma bobina de transformador. ....	29
Figura 9 - Representação do enrolamento primário e do enrolamento secundário. ....	30
Figura 10 - Fluxo produção do cobre. ....	33
Figura 11 - Cadeia produtiva do alumínio. ....	34
Figura 12 - Representação das fases do ciclo de vida. ....	37
Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa. ....	38
Figura 14 - Processo fabricação bobinas baixa tensão. ....	40
Figura 15 - Processo fabricação bobinas de alta tensão. ....	41
Figura 16 - Processo montagem de núcleo de silício. ....	41
Figura 17 - Processo de fabricação de tanque. ....	42
Figura 18 - Encolunamento e ligação elétrica do transformador de alumínio. ....	42
Figura 19 - Encolunamento e ligação elétrica do transformador de cobre. ....	43
Figura 20 - Pintura eletrostática e montagem final. ....	43
Figura 21 - Ensaio final e expedição. ....	44
Figura 22 - Estrutura da ACV. ....	44
Figura 23 - Fronteira do Sistema analisado. ....	47
Figura 24 - Elementos mandatórios da avaliação de impacto do ciclo de vida. ....	48
Figura 25 - Pontos de extremidade e pontos médios da categorias de impacto. ....	49
Figura 26 - Fluxo geral do ciclo de vida, posto como rede, do transformador com bobina em alumínio. ....	57
Figura 27 - Fluxo geral do ciclo de vida, posto como rede, do transformador com bobina em cobre. ....	57
Figura 28 - Distribuição percentual das categorias de impactos para os transformadores de alumínio e de cobre. ....	61
Figura 29 - Distribuição percentual da avaliação de danos. ....	62
Figura 30 - Resultados do impacto normalizados, transformadores cobre x alumínio, método Eco-indicador 99. ....	63
Figura 31 - Análise de incerteza “transformador-cobre” (A) menos 1 kg “transformador-alumínio” (B). ....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo das declarações ambientais.....	36
Quadro 2 - Características elétricas dos transformadores escolhidos.....	46
Quadro 3 - Lista de entradas do ciclo de vida do transformador 75 kVA de alumínio.....	52
Quadro 4 - Lista de entrada do ciclo de vida de um transformador de 75 kVA de cobre.....	53
Quadro 5 - Lista de saídas do ciclo de vida do transformador 75 kVA de alumínio.....	54
Quadro 6 - Lista de saídas do ciclo de vida do transformador 75 kVA de cobre.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantificação de massa e de energia entradas.....	55
Tabela 2 - Quantificação de massa saída resíduos.....	55
Tabela 3 - Contribuição relativa por processo. ....	58
Tabela 4 - Fluxos com maior contribuição nas categorias de impacto.....	59
Tabela 5 - Análise de incerteza para ACV, transformador de cobre (A) – transformador de alumínio (B).....	64

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Projeto elétrico transformador – alumínio .....	75
Apêndice B – Projeto elétrico transformador – cobre .....	76
Apêndice C – Relatório de ensaios transformador – alumínio .....	77
Apêndice D – Relatório de ensaios transformador – cobre.....	78
Apêndice E – ICV dos transformadores – cobre e alumínio .....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	- Asea Brown Boveri
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C	- Antes de Cristo
ACV	- Avaliação do ciclo de vida
AICV	- Avaliação do impacto do ciclo de vida
AWG	- <i>American wire gauge</i> (escala americana normalizada)
c	- Unidade medida cento
°C	- Celsius, unidade de temperatura
CBAC	- Comitê Brasileiro de Avaliação da Conformidade
CCV	- Ciclo do custo de vida
CH <sub>4</sub>	- Gás metano
CILCA	- Conferência Internacional do Ciclo de Vida no Brasil
CIRED	- Conferência Internacional em Distribuição de Eletricidade
cj	- Unidade medida conjunto
CML	- <i>Institute of Environmental Sciences</i> of Leiden University
CML 2001	- Método para a avaliação de impactos ambientais
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de carbono, conhecido como gás carbônico
CONMETRO	- Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CRADLE -TO- GATE	- Delimitação de um sistema ACV (do berço ao portão)
CV	- Coeficiente de variação
cx	- Unidade medida caixas
ECOINVENT	- Biblioteca de inventario do ciclo de vida (banco de dados)
ENDPOINT	- Utilização de indicadores de nível de ponto extremidade
EPD	- <i>Environmental product declaration</i> (declaração ambientais de produtos)
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
FORNO FLASH	- Separa a ganga e os sulfetos, ou seja, separa a escória do mate
GABI	- <i>Software</i> para avaliação do ciclo de vida
HALL-HÉROUKT	- Processo elétrico de refinação da bauxita (pilha eletrolítica)
IBICT	- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	- Inventário do ciclo de vida
ILCD	- Sistema internacional de referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
KCL Ecodata	- Biblioteca de inventario do ciclo de vida (banco de dados)
kVA	- Quilovolt-ampère, unidade de medida de potência elétrica (igual a 10 <sup>3</sup> Volt-ampères)
kg	- Unidade medida quilograma
kWH	- Unidade medida quilowatt-hora

l	- Unidade medida litro
m	- Unidade medida metro
m <sup>3</sup>	- Unidade medida metro cúbico
MCT	- Ministério da Ciência e Tecnologia
MIDPOINT	- Utilização de indicadores de nível de ponto médio
mil	- Unidade medida milheiro
MVA	- Megavoltampère, unidade de medida de potência elétrica (igual a 10 <sup>6</sup> Volt-ampères)
NBR	- Norma Brasileira aprovada pela ABNT
OACV	- Ontologia de avaliação do ciclo de vida
PAPEL KRAFT	- Papel fabricado com mistura de fibras de celulose curtas e longas
PBAC	- Programa Brasileiro de Avaliação da Conformidade
PBACV	- Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
pç	- Unidade medida de peças
PFCs	- Perfluorcarbonetos
PRESSPAHN	- Papelão prensado de pura celulose
SD	- Desvio padrão
SICV	- Sistema de inventário do ciclo de vida
SIMAPRO	- <i>Software</i> para avaliação do ciclo de vida
SINMETRO	- Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
SX-EW	- Processo produção do cobre, lixiviação, extração por solvente e eletrodeposição
UMBERTO	- <i>Software</i> para avaliação do ciclo de vida
V	- Volt, unidade de tensão elétrica
W	- Watt, unidade de potência

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 Objetivo geral</b> .....	16
1.1.1 Objetivos específicos .....	16
<b>1.2 Justificativa</b> .....	16
<b>1.3 Estrutura do texto</b> .....	18
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
<b>2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)</b> .....	20
<b>2.2 Transformador</b> .....	27
2.2.1 Montagem do transformador de distribuição.....	27
2.2.2 Bobinas de transformadores .....	28
<b>2.3 Cobre</b> .....	31
<b>2.4 Alumínio</b> .....	34
<b>2.5 ACV de transformadores com bobinas de cobre e bobinas de alumínio</b> .....	35
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	37
<b>3.1 Obtenção de dados pela bibliografia</b> .....	39
<b>3.2 Estudo de caso</b> .....	39
3.2.1 Fabricação dos transformadores .....	40
<b>3.3 Método de ACV</b> .....	44
3.3.1 Definição do escopo .....	45
3.3.2 Análise de inventário do ciclo de vida.....	48
3.3.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) .....	48
3.3.4 Interpretação .....	50
3.3.5 Incertezas do estudo ACV .....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
<b>4.1 Construção do inventário do ciclo de vida</b> .....	51
<b>4.2 A análise da rede com o diagrama de <i>Sankey</i></b> .....	55
<b>4.3 Análise de inventário do ciclo de vida</b> .....	56
<b>4.4 Avaliação de impacto do ciclo de vida</b> .....	58
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	65
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	67
<b>APÊNDICES</b> .....	75

# 1 INTRODUÇÃO

A exploração de minérios e metais, em especial do cobre e do alumínio, continuam em crescimento em todo o mundo, emitindo grandes quantidades de poluentes. Para a fabricação de transformadores de distribuição de energia elétrica são utilizados fios e lâminas de cobre ou de alumínio para a confecção das bobinas elétricas.

Todo o produto provoca um impacto no meio ambiente, seja em função de seu processo produtivo, das matérias-primas que consome, ou devido ao seu uso. Em razão dos impactos ambientais e da busca pela melhor utilização dos recursos naturais, tem-se realizado estudos da análise do ciclo de vida (ACV) dos produtos, consistindo em balanços materiais e energéticos, analisando-se desde a extração da matéria-prima até a sua destinação final, com o objetivo de conhecer o produto e seu impacto no meio ambiente.

Esse método é uma ferramenta para calcular o impacto ambiental dos produtos e/ou dos sistemas durante as diferentes fases do ciclo de vida (CARLEN, 2011), servindo de auxílio na tomada de decisão na escolha de processos e produção de determinados produtos. Para assegurar a qualidade e a consistência da ACV utilizam-se as normas da série da NBR ISO 14000. Chehebe (1998) esclarece que a ACV é uma ferramenta técnica, de caráter gerencial que, além de outras aplicações, propõe-se a contribuir para a forma mais consistente de decisão, avaliando os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto.

A metodologia ACV é a única que permite a identificação da transferência de impactos ambientais de um meio para outro e/ou de um estágio de ciclo de vida para outro (FERREIRA, 2004). Os resultados obtidos na ACV podem resultar em redução de impacto no meio ambiente, haja vista que se pode avaliar onde estão os maiores impactos. O novo padrão de mercado exige uma produção mais limpa e focada na redução de agressões ao meio ambiente.

Neste contexto, busca-se resposta a seguinte indagação: qual dos materiais, condutor de cobre ou de alumínio, na confecção de bobinas para transformadores de distribuição de energia elétrica resultam em menor prejuízo ao meio ambiente?

## 1.1 Objetivo geral

Realizar o estudo da ACV das bobinas manufaturadas com fios de alumínio e das bobinas manufaturadas com fios de cobre nos transformadores de distribuição em líquido isolante a fim de determinar o tipo que apresenta menor impacto ambiental.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- a) Realizar o inventário do ciclo de vida (ICV) de dois transformadores de distribuição com bobinas de alumínio e com bobinas de cobre, a partir dos dados de entrada e saída nos processos do ciclo de vida, com apoio do software SimaPro;
- b) Identificar as categorias de impacto que envolvem a análise do ciclo de vida das bobinas de alumínio e das bobinas de cobre nos transformadores de distribuição;
- c) Comparar o impacto ambiental das bobinas de alumínio e das bobinas de cobre, desde a extração de matérias-primas até os ensaios finais de dois transformadores, a fim de verificar qual das duas gera menor prejuízo ao meio ambiente.

## 1.2 Justificativa

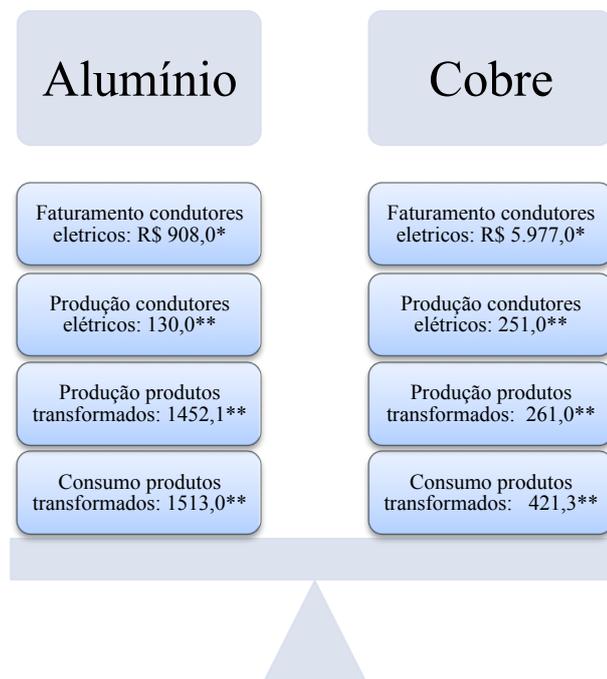
A realização da presente pesquisa justifica-se como ferramenta para auxiliar às indústrias fabricantes de transformadores, concessionárias de energia e consumidores na escolha do material a ser utilizado para a fabricação de bobinas. A partir do estudo realizado foi possível indicar a bobina que causa menor impacto ao meio ambiente e auxiliar o público alvo a tomar decisões ambientalmente corretas.

Existem estudos afirmando que a substituição do cobre pelo alumínio nos aparelhos de ar condicionado reduzem a emissão dos gases de efeito estufa, sendo que a fundição e o processamento são os fatores que mais contribuem para o impacto no meio ambiente (GUAN, 2013). Por outro lado, há pesquisa desenvolvida comprovando que o uso de cobre em transformadores permite uma redução significativa das perdas nas redes elétricas de distribuição, mitigando a emissão de gás carbônico (IEI, 2012).

A influência das perdas parasitas do condutor de cobre é 3,3 vezes menor que a perda

por corrente parasita do alumínio. O cobre apresenta resistividade 39% menor e resistência à ruptura 4,7 vezes maior que o alumínio, apresentando-se como alternativa capaz de resistir aos transitórios eletromagnéticos existentes no sistema (SALUSTIANO, 2012).

Durante muito tempo, a preferência foi por fios e lâminas de cobre. Contudo, por ser o terceiro elemento mais encontrado e o mais abundante entre os elementos metálicos a preferência passou a ser pelos fios e lâminas de alumínio (CARDOSO, 2011). Aliado a este fator inclui-se, também, o preço mais alto do cobre em relação ao alumínio (LME, 2014). A figura 1 apresenta uma comparação entre o cobre e o alumínio no Brasil referente ao ano de 2013. O faturamento da indústria do cobre foi 5 vezes superior ao faturamento da indústria do alumínio, no caso de condutores elétricos a produção de condutores de cobre foi quase 2 vezes maior que a produção de condutores de alumínio, porém, a produção de produtos transformados e o consumo dos produtos transformados na indústria do alumínio se mostrou superior.



\* em milhões de reais ; \*\*em milhares toneladas

Figura 1 - Comparação entre alumínio e o cobre no ano 2013.

Fonte: Adaptada do Sindicel & ABCobre (2014).

### 1.3 Estrutura do texto

Para a descrição da pesquisa o texto foi estruturado em cinco partes, juntamente com a introdução. Na primeira parte contextualiza-se ao leitor os temas trabalhados, são expostos os objetivos da pesquisa e a justificativa. Em seguida é apresentada a revisão bibliográfica. Nessa parte analisou-se aspectos envolvendo a ACV, bobinas de transformadores, características do cobre e do alumínio. É, também, realizado um levantamento teórico a respeito de estudos previamente existentes sobre a temática. A figura 2 representa a estrutura do referencial teórico.

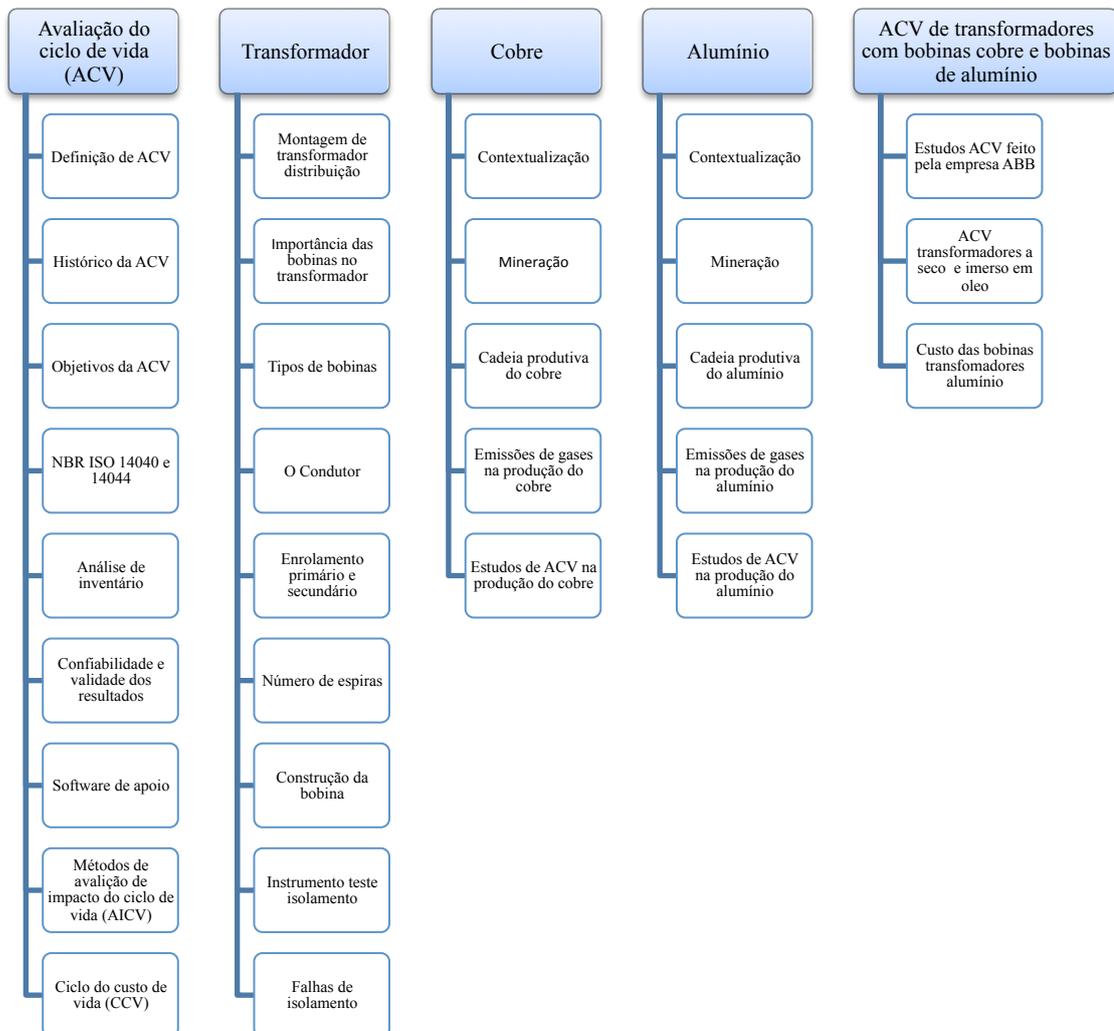


Figura 2 - Estrutura do referencial teórico.

A metodologia para o desenvolvimento da pesquisa é apresentada na terceira etapa. Na quarta etapa é apresentado o estudo de caso e os resultados e análises dos dados obtidos com as técnicas empregadas. Nas considerações finais são apontados os pontos fortes e as limitações da pesquisa desenvolvida, relatando-se as contribuições teóricas e práticas do estudo, as implicações nas atividades e no apoio às decisões da empresa em que se realizou a pesquisa, bem como as recomendações para revisão das práticas estabelecidas e, posterior, desenvolvimento na área de estudo visando ao seu incremento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A filosofia do pensamento do ciclo de vida é confundida com a realização de estudos de avaliação do ciclo de vida. Pensar o produto de forma estruturada em toda sua abordagem de gestão significa o pensamento do ciclo de vida (LAMB; NASS, 2014). A figura 3 representa ciclo de vida de um produto da extração à disposição final.



Figura 3 - Ciclo de vida do produto da extração à disposição final.  
Fonte: UNEP (2007, p.12).

A ACV, conhecida internacionalmente por LCA (*Life cycle assessment*), é um instrumento de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo que compreende etapas que vão desde a retirada das matérias-primas elementares da natureza que entram no sistema produtivo à disposição do produto final após o uso (CHEHEBE, 1998). Trata-se de uma técnica iterativa e, conforme as informações são coletadas, vários aspectos do escopo podem exigir modificações para atender ao objetivo inicial (ABNT, 2009a). Também é avaliada a pressão global sobre o meio ambiente de um produto a partir da perspectiva de ciclo de vida, concentrando-se nas emissões e nos recursos consumidos (BARBERIO, 2014).

É uma ferramenta utilizada na ecologia industrial, sendo valiosa para a avaliação do potencial impacto ambiental de produtos e materiais. Por esse motivo, nas últimas décadas, muitas empresas estão internalizando-a como formas de gestão ambiental (YELLISHETTY, 2009), já que, a efetiva otimização do processo, ainda que restrita a um estágio do ciclo de vida, pode resultar numa redução sistêmica dos efeitos negativos no meio ambiente causados pela ação antrópica (GUERRA, 2014). O seu escopo de aplicação é sistêmico, compreendendo todas as ações antrópicas e, muito embora seja técnica recente e que ainda necessita de ajustes metodológicos, ganhou expressão rapidamente (HANSEN, 2010).

Na indústria de bebidas, em 1969, foi desenvolvido os primeiros estudos para embalagens, quantificando-se os recursos necessários, as emissões e os resíduos. Um dos resultados encontrados foi o de que, ambientalmente, as garrafas de plásticos não eram piores que as de vidro (HUNT; FRANKLIN, 1996).

Em 1997 foi publicada a norma *International Organization for standardization* (ISO) 14040, e, conforme Ferreira (2004), com a necessidade de elaboração de declaração ambientais as empresas passaram a utilizar a ACV. A figura 4 apresenta os principais marcos históricos da ACV no Brasil.

As áreas no Brasil que mais têm utilizado a ACV são: a agricultura, a agroindústria, a logística, usinas de cana-de-açúcar e etanol, as indústrias de eletrodomésticos, materiais odontológicos, farmacêutica, têxtil, siderurgia, refinaria de petróleo, de plástico, de cimento, de cerâmica e química (WILLERS, 2013). Na área científica, foi realizado levantamento de trabalhos no banco de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), utilizando a busca “avaliação do ciclo de vida”, sendo identificado 61 trabalhos defendidos de janeiro de 2010 até julho 2015. Destes, duas dissertações de mestrado profissional, quarenta e cinco dissertações de mestrado acadêmico e quatorze teses de doutorado, conforme figura 5. Dentre as universidades que desenvolveram mais pesquisas, destaca-se a Universidade Federal de Santa Catarina com nove dissertações/teses equivalendo a 14,75% do total, a Universidade de São Paulo com sete dissertações/teses equivalendo a 11,48% do total, seguido pela Centro Federal de Educação Tecn. Celso Suckow da Fonsecacom cinco dissertações/teses ou 8,20% do total, (CAPES, 2015). Foi também consultado o Google Acadêmico utilizando a busca “avaliação do ciclo de vida” considerando artigos e citações desde 1995 a 2015, sendo encontrados 2430 resultados, conforme apresentado na figura 6.

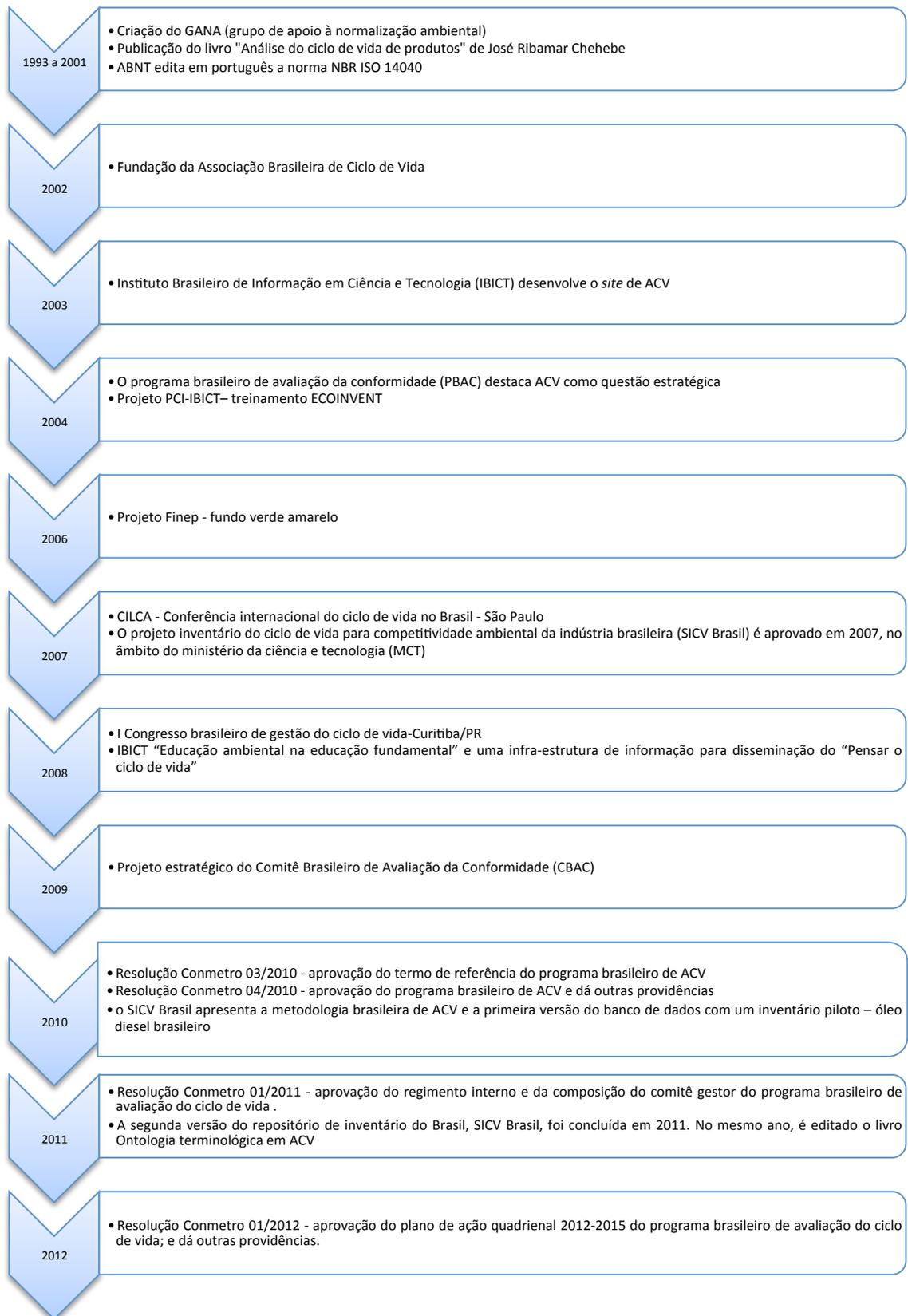


Figura 4 - Marcos históricos da ACV no Brasil.  
 Fonte: Adaptada do Inmetro (2015).

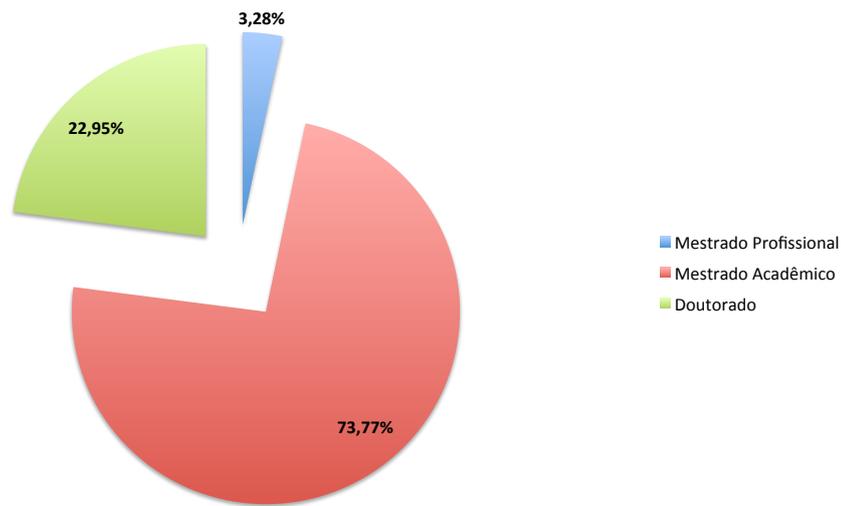


Figura 5 - Trabalhos Acadêmicos de ACV no banco de teses da CAPES.

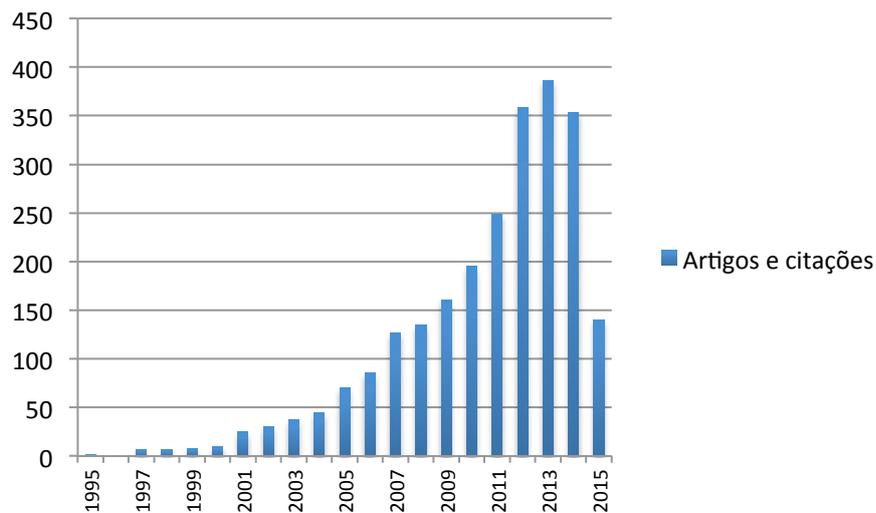


Figura 6 - Artigos ou citações no Google Acadêmico - "avaliação do ciclo de vida".

O Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) estabelece diretrizes no âmbito do sistema nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial (SINMETRO), para dar continuidade e sustentabilidade às ações de ACV no Brasil. O PBACV possui um Comitê Gestor atualmente presidido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e secretariado pelo Inmetro (INMETRO, 2015).

O objetivo da ACV refere-se à aplicação pretendida, razões para a execução do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas. O

Estudo de ACV é dividido em quatro fases: a) definição do objetivo e escopo: sendo definido o propósito do estudo e sua amplitude, envolvendo decisões sobre as fronteiras e a unidade funcional; b) análise do inventário: em que são levantadas informações sobre o sistema do produto, entradas e saídas consideradas relevantes para o sistema; c) avaliação dos impactos: considerando os dados e as informações gerados da análise de inventário associando-se a impactos ambientais específicos, de forma a avaliar os impactos potenciais e; d) fase de interpretação: combina-se e interpreta-se os resultados obtidos nas fases de análise de inventário e de avaliação de impacto de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo (CETEA, 2007).

A ontologia tem sido, cada vez mais, utilizada como meio de estruturar os conhecimentos de domínio para permitir melhor acesso de utilização da ACV. A ontologia de Avaliação do Ciclo de Vida (OACV) se caracteriza como ontologia terminológica, uma vez que as definições estão expressas em linguagem natural, sem o uso de formalismos para a descrição de conceitos, com o objetivo de facilitar a comunicação entre os que se utilizam da gestão de ciclo de vida (SILVA, 2014).

A ISO estabelece a estrutura de trabalho, metodologias e procedimentos que apoia ACV. No Brasil, em relação a ACV estão em vigor as normas ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009. A NBR ISO 14040:2009 descreve a estrutura geral e os princípios da ACV e, a NBR ISO 14044: 2009 especifica os requisitos e orientações para a ACV (ABNT, 2009a, 2009b).

As normas ISO definem requisitos gerais para a condução de ACV's estabelecendo critérios éticos para a divulgação dos resultados ao público:

O propósito dessas normas é fornecer às empresas ferramentas para a tomada de decisão bem como a avaliação de alternativas sobre métodos de manufatura. Elas podem, também, ser usadas para dar apoio às declarações de rótulos ambientais ou para selecionar indicadores ambientais (CHEHEBE, 1998, p. 9).

Questão crítica na realização da ACV é a definição dos dados de inventário de confiança (YOSHIDA, 2014). Nos países desenvolvidos existem bancos de dados de inventários de ciclo de vida (ICV) sobre vários produtos. A análise de inventário refere-se a fase da coleta e da quantificação de todas as variáveis envolvidas durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade. Algumas atividades devem ser observadas para a análise do inventário: preparação para a coleta de dados, coleta de dados, refinamento dos limites do sistema, determinação dos procedimentos de cálculo e procedimentos de alocação (CHEHEBE, 1998).

Para Vasconcelos (2014), os princípios fundamentais de modelagem de ICV que podem ser aplicados são: a) modelagem atribucional que segue a lógica geral de cadeia de abastecimento real e da cadeia de valor (além do uso e do tratamento de fim de vida); ou, b) modelagem consequencial de ciclo de vida que representa a cadeia de abastecimento genérica.

A realização dos cálculos inclui a validação dos dados, podendo envolver balanços de massa, balanço de energia e análises comparativas de fatores de emissão; correlação dos dados aos processos elementares; correlação dos dados aos fluxos de referência e a unidade funcional (SEIFFERT, 2011). A confiabilidade e a validade dos resultados da ACV podem ser melhoradas com o estabelecimento de diferença espacial e temporal, pois a localização e os dados específicos temporais raramente estão disponíveis nos processos de ACV. Assim, recomenda-se direcionar esforços na geração de bases de dados com tempo e localização específica (YELLISHETTY, 2009).

Existem *softwares* como SimaPro e Umberto, bem como bases de dados disponíveis como Ecoinvent e KCL Ecodata que tornam a análise mais precisa e rápida. Utilizando-se as ferramentas existentes e tendo-se conhecimento do processo produtivo é possível ter a visão crítica do que ocorre ao longo do ciclo de vida do produto (FRANCISCO, 2013).

A parametrização tem sido utilizada em softwares como o Gabi e o SimaPro por algumas vezes. Os benefícios dos dados da parametrização são de transparência (dados brutos e cálculos podem ser documentados e revistos), a valorização do potencial para representar as variantes do processo (variações de carga, eficiência do processo etc.) e, a melhoria das capacidades de interpretação (COOPER, 2012).

Existem diferentes métodos de AICV (TAKEDA, 2010). Entre eles pode-se destacar: CML, Eco-Indicador, EDIP, EPS, Impact 2002+. As categorias de impacto são avaliadas pela maioria dos métodos de AICV estudados. O método CML (*Institute of Environmental Sciences*) da Universidade de Leiden na Holanda (GUINEE, 2001), utiliza os fatores disponibilizados na versão disponível em 2010 CML 2001. Caracteriza-se como método de abordagem *midpoint*<sup>1</sup>, possuindo as seguintes categorias de impacto: acidificação, redução da camada de ozônio, redução de recursos abióticos, ecotoxicidade, eutrofização, formação fotoquímica de ozônio troposférico, mudança climática, uso do solo, oxidação fotoquímica, radiação ionizante e toxicidade humana (GUINEE, 2001).

O método Eco-Indicador 99, foi desenvolvido na Holanda, caracterizando-se por ser

---

<sup>1</sup> *Midpoint* significa a utilização de indicadores de nível de ponto médio, realizando-se uma abordagem orientada a problemas (SIMAPRO, 2014).

método de ponto extremidade (*endpoint*<sup>2</sup>) que possibilita a simplificação e análise dos resultados, utilizando a abordagem orientada ao dano, a modelagem da cadeia de causa, os efeitos até os pontos extremidade, verificando danos à saúde humana, qualidade de ecossistema e a escassez de recursos. Cabe referir que, o *endpoint* pode ocasionar maior incerteza já que, é maior a distância entre o processo unitário e seu efeito.

A estrutura do Eco-Indicador 99 envolve a caracterização dos efeitos ambientais, avaliação de danos ambientais na saúde humana, a qualidade dos ecossistemas, a degradação dos recursos naturais, a normalização e a avaliação de impactos ambientais (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2001). Os impactos são avaliados com relação as substâncias emitidas a partir do ciclo de vida do produto ou processo e seus fatores de caracterização analisados para cada categoria de impacto, utilizando dados de ICV (KALAKUL, 2014).

As categorias de *midpoint* de impactos que são avaliados em relação a saúde humana: agentes cancerígenos (carcinogenia), poluentes que causam efeitos respiratórios a respiração de compostos orgânicos e inorgânicos. Ademais, a mudança climática resultante do aumento de doenças e mortes causados pelas alterações climáticas, incluindo os impactos relacionados com as emissões de gases de efeito estufa. Também, analisam-se os danos por radiação, a destruição da camada de ozônio devido ao aumento da radiação ultra violeta, a determinação da ecotoxicidade e os danos de acidificação/eutrofização dos ecossistemas qualidade, como resultado da emissão de substâncias para acidificar o ar. O uso da terra tem impacto sobre a diversidade de espécies e com base em observações de campo. O esgotamento de recursos é outra caracterização porque a humanidade normalmente extrai primeiro os melhores recursos. Esse dano será experimentado pelas gerações futuras vez que usarão mais esforços para extrair os recursos restantes. O grau de superávit minerais está diminuindo e isso também é considerado. E, o último aspecto analisado é o excedente de combustíveis fósseis, como resultado de recursos de qualidade inferior (YELLISHETTY, 2009; VÁZQUEZ-ROWE, 2014; KLINGLMAIR et. al, 2014; KOFFLER, 2014; VARGAS, 2015).

O método EDIP 97 (*Environmental Design of Industrial Products*) desenvolvido na Dinamarca, representa a Universidade Técnica da Dinamarca (DTU), indústrias dinamarquesas e Agência de Proteção Ambiental, sendo sucedido pelo EDIP 2003, tratando-se de um método *midpoint*. As categorias de impacto do EDIP 97 contempla os seguintes grupos: impactos ambientais, consumo de recursos e impactos no ambiente de trabalho (WENZEL, 1997). O método apresenta aplicação global para todas as categorias de impacto.

---

<sup>2</sup> *Endpoint* significa a utilização de indicadores de nível de ponto de extremidades na AICV, realizando-se uma abordagem orientada aos danos (SIMAPRO, 2014).

O EDIP 97 apresenta fatores de caracterização para todos os compostos orgânicos voláteis de origem petroquímica e para depleção de ozônio com horizontes de tempo mais curtos (5 a 20 anos), avaliação diferenciada do ambiente de trabalho e revisão externa por pares dos modelos de caracterização. A EDIP 2003 contempla fatores de caracterização locais para mais de quarenta regiões e genéricos compatíveis baseados na média europeia de ponderação (ECR-JRC, 2010).

O EPS é o método de avaliação *endpoint* criado na Suécia para ajudar designers e desenvolvedores de produtos. O método abrange em torno de 200 substâncias sendo os efeitos calculados por substância (ECR-JRC, 2010).

O Impact 2002+ é o método suíço que combina a abordagem *midpoint/endpoint* ligando os resultados de ICV por meio de quatorze categorias *midpoint* e quatro *endpoint* (JOLLIET, 2003). As categorias de dano analisadas são saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e os recursos utilizados.

O ciclo do custo de vida (CCV) ainda não tem padronização metodológica. Em 2011 foi proposto o “código de prática” para o CCV que propicia análise consistente para a tomada de decisões. O CCV menciona todos os custos do ciclo de vida e os respectivos responsáveis (atores), sendo que os dados podem ser apresentados informando todos os que participam desta etapa da cadeia (SWARR, 2011).

## **2.2 Transformador**

O transformador é um dispositivo destinado a transformar energia ou potência elétrica de um sistema para o outro a fim de elevar ou baixar as tensões. Os transformadores podem ser de baixa potência e de média/alta potência. O funcionamento do transformadores baseia-se nos fenômenos de mútua indução entre dois circuitos eletricamente isolados mas magneticamente ligados (MARTIGNONI, 1991).

### **2.2.1 Montagem do transformador de distribuição**

A produção do transformador de distribuição passa por três etapas na linha de produção: a) bobinagem; b) montagem da parte ativa; c) montagem final. A bobinagem é a fase de confecção de bobinas.

A parte interna do transformador - parte ativa - é constituída basicamente de núcleo magnético e de bobinas. O núcleo magnético é confeccionado com chapas de aço silicioso ou de material amorfo. As bobinas são montadas no núcleo e o conjunto é fixado por armaduras e calços, formando a parte ativa.

A montagem final do transformador ocorre quando a parte ativa é colocada no tanque que, em seguida, é imerso em óleo mineral ou vegetal. O óleo tem funções dielétrica e de refrigeração. A figura 7 mostra a imagem esquemática do transformador de distribuição de 75 kVA.

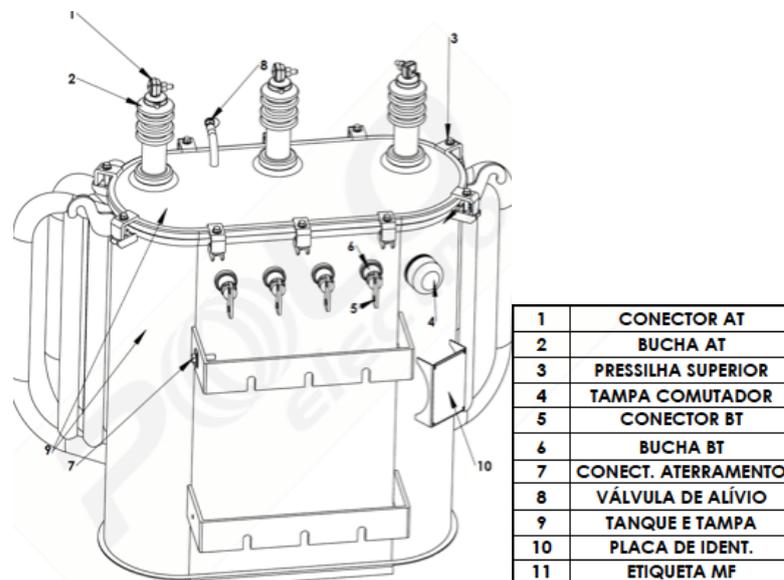


Figura 7 – Identificação dos componentes do transformador 75 kVA.  
Fonte: Electro Polo Ltda (2015).

### 2.2.2 Bobinas de transformadores

A parte mais importante do projeto de um transformador são as bobinas pelas suas características elétricas, mecânicas e do custo. Eletricamente necessitam de características de isolamento adequado à classe de tensão e temperatura de operação compatível à classe de temperatura. Mecanicamente são expostas às forças eletromagnéticas durante os curtos-circuitos no sistema elétrico. Grande parte do custo concentra-se nos enrolamentos (RIES, 2007).

As bobinas são elementos construtivos dos transformadores, confeccionadas com condutores elétricos (fios ou lâminas) de cobre ou de alumínio isolados com papel, poliéster

ou verniz e enrolados em diversas formas geométricas. Os enrolamentos podem ser bobinados horizontalmente ou verticalmente. A figura 8 representa uma bobina de transformador.

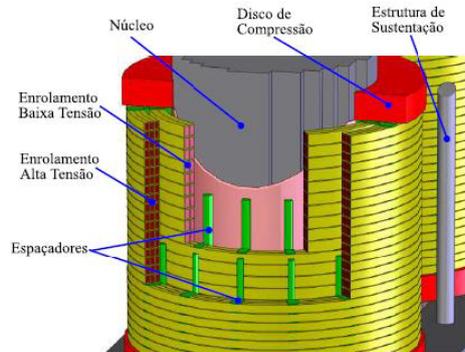


Figura 8 - Componentes de uma bobina de transformador.  
Fonte: Costa (2013).

Existem dois tipos de bobinas: bobinas helicoidal (em camadas) e bobinas em discos. Quanto à disposição das bobinas, podem ser concêntricas ou intercaladas (discos ou panquecas) e, nos transformadores de distribuição as bobinas são enroladas com condutores circulares ou retangulares (fios ou lâminas) de cobre ou de alumínio (RIES, 2007).

Os enrolamentos são executados em material de boa condutibilidade elétrica dotados de resistividade, função da temperatura de operação. A determinação da bitola do condutor do enrolamento primário segue uma densidade superficial de corrente estabelecida no projeto. Os condutores circulares utilizam a escala *american wire gauge* (AWG), encontrados em bitolas pares e ímpares (SIMONE, 1998).

Os condutores do primário (alta tensão), via de regra, são isolados com camada dupla de verniz sintético e o enrolamento é construído em camadas isoladas entre si por folhas de papel kraft neutro. A espessura dos isolamentos depende das solicitações dielétricas nos enrolamentos para alta tensões (RIES, 2007).

O secundário (baixa tensão) é enrolado com fios retangulares isolados com fita de papel kraft ou enrolado com lâminas com uma fita de papel que funciona como isolamento entre espiras. A determinação da bitola do condutor no enrolamento secundário ou de baixa tensão é especificada a partir da potência nominal da unidade transformadora, sendo que o projeto estabelece a corrente nominal com a densidade de corrente, determinando a seção da barra de cobre do enrolamento de baixa tensão (SIMONE, 1998). A quantidade de corrente

que passa no condutor por unidade de área é a densidade de corrente (SALUSTIANO, 2012). A figura 9 representa o enrolamento primário e o enrolamento secundário. A razão entre as tensões de entrada ( $V_1$ ) e saída ( $V_2$ ) é diretamente proporcional à razão entre o número de espiras do primário ( $N_1$ ) e número de espiras do secundário ( $N_2$ ). Já, a razão entre as correntes elétricas ( $I_1$ ,  $I_2$ ) é inversamente proporcional à razão do número de espiras.

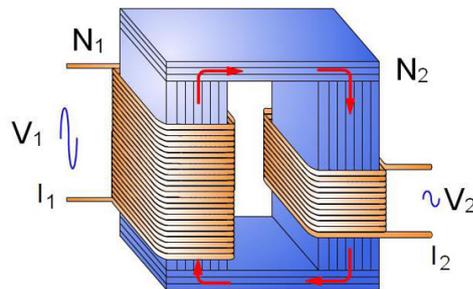


Figura 9 - Representação do enrolamento primário e do enrolamento secundário.  
Fonte: Electricidad y electrónica industrial (2015).

A determinação do número de espiras de enrolamento secundário deve ser determinado antes do número de espiras do enrolamento primário, em razão do pequeno número de espiras daquele aliado à elevada corrente que por ele circula (SIMONE, 1998).

As bobinas são construídas sobre moldes cilíndricos, podendo ser direita ou esquerda, dependendo do sentido da mesma. Os cilindros de papelão prensado de pura celulose tipo *presspahn* ou *weidmann* (suíço) são utilizados para isolar bobinas e núcleo bem como, isolar bobinas de média e de baixa tensão. Cadarços e cola são utilizados como elementos de amarração e de fixação (RIES, 2007).

Os enrolamentos do transformador são construídos separadamente e, devido à umidade absorvida pelo material isolante, as bobinas devem ser secadas em estufa. O tratamento realiza-se em temperaturas entre 90 a 100°C e durante 24 a 36 horas (RIES, 2007).

Em estudo realizado com cerâmicas verificou-se que o impacto de maior significância é ocasionado pelo uso de gás natural das etapas de atomização, secagem e sinterização do porcelanato, onde ocorre o maior consumo de energia fabril do setor. Logo, medidas para reaproveitamento do ar quente entre as etapas do processo produtivo, podem resultar em reduções significativas no consumo de energias, bem como, se a secagem ocorrer de maneira rápida, eficiente e com baixo desperdício, controlando as taxas de aquecimento, circulação de ar, temperatura e umidade (HANSEN, 2010).

O instrumento utilizado na verificação do isolamento entre enrolamentos e entre enrolamentos e a massa é o megômetro. A resistência determinada é o dado que demonstra o estado de isolamento do transformador antes de submetê-lo aos ensaios dielétricos (OLIVEIRA, 2003). O ensaio de tensão aplicado é utilizado para detectar falhas na isolação das bobinas do transformador sendo considerado o mais efetivo. O teste é realizado aplicando-se tensão nos terminais de alta até que a tensão nominal seja alcançada (QUAN, 2013). Uma das razões de falhas internas nos enrolamentos dos transformadores é o enfraquecimento do isolamento dos seus condutores face às vibrações causadas pelas forças eletromecânicas, reduzindo significativamente a vida útil do transformador (ROSENTINO JR, 2010).

No Brasil, o tratamento de resíduos elétricos e eletrônicos consome muita energia e, grande parte desta vem de fontes renováveis (hidrelétricas), tornando os referidos processos menos prejudiciais ao meio ambiente. Objetivando melhor desempenho ambiental no tratamento de resíduos deve utilizar menor transporte e, conseqüentemente, menor consumo de combustíveis fósseis de forma a reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Com o tratamento de resíduos permite-se a reintegração de matérias-primas secundárias, resultando em economia de recursos naturais no Brasil (MORAES, 2014).

### **2.3 Cobre**

O cobre foi o segundo metal usado pelo homem, depois do ouro. O cobre martelado foi encontrado entre os restos dos Caldeus, povo de origem semita que vivia no sul da Mesopotâmia, em 4500 a.C. Estima-se que a produção de cobre acumulado entre 2000 a.C. e 700 a.C. foi estimado em 500 mil toneladas (AYRES, 2002).

Com exceção da prata, o cobre tem a maior condutividade elétrica dos metais, aproximadamente duas vezes maior que o alumínio. Material com condutividade menor requer maior quantidade de material para a realização do produto. O cobre ajuda a aumentar a eficiência energética. A capacidade de reciclagem do cobre, sem perda de desempenho, é de 100%, fator este que também deverá ser incluído nas avaliações comparativas (KUPFERINSTITUT, 2014).

Quanto à mineração, o cobre foi extraído exclusivamente a partir de emendas subterrâneas até o século 20, o teor médio de minério de cobre extraído nos EUA em 1900 (inteiramente no subsolo) foi de 3,4% com uma taxa de recuperação de 61% (AYRES, 2002).

Existem processos básicos de produção de cobre primário: o processo pirometalúrgico, o processo hidrometalúrgico e o processo de biopurificação ou biolavagem. No pirometalúrgico, a transformação do cobre tem início a partir do minério. Após, é submetido a britagem, moagem, flotação e secagem. O concentrado é submetido ao forno *flash* e, este ao conversor de onde é obtido o blister. A partir daí, dependendo da pureza desejável para o cobre, o blister se submete ao refino a fogo (ânodo 99,7%) ou eletroliticamente (cátodo 99,9%). Os cátodos são submetidos ao processo de simples refusão para obter-se o vergalhão, a partir do qual são feitos os fios (ANDRADE, 1997). No processo SX-EW (lixiviação, extração por solvente e eletrodeposição) pela técnica hidrometalúrgica obtém-se o cobre eletrolítico partir de solventes e de eletrodeposição obtendo-se soluções ricas em cobre. Segue-se a filtração da solução e a precipitação do metal pela de concentração, aquecimento ou eletrólise. Nessa técnica se obtém o cátodo com teor de 99,9% sem a necessidade de fundição e refinaria. Há vantagens como a não emissão de gases poluentes como enxofre. A grande desvantagem é a dificuldade do aproveitamento de subprodutos, necessitando de instalações de neutralização e cianetação. O processo de biopurificação ou biolavagem de beneficiamento à base de micróbios é um sistema simples e econômico, sendo que as bactérias purificam o metal (ANDRADE, 2001). A partir dos processos relatados, o vergalhão é obtido dos quais se extrai os fios de cobre, de seção retangular ou circular a fim de proceder aos enrolamentos concêntricos para a obtenção das bobinas.

As emissões nas operações de mineração e fundição estão cada vez mais sob controle, sendo que as questões ambientais relacionadas com a saúde, o benefício econômico de recuperação de enxofre e de subprodutos (prata e ouro), estão impulsionando a indústria de mineração em direção à gestão mais eficientes de resíduos. Os estudos de ACV no cobre indicam a necessidade de uma melhor reciclagem do mesmo já que a disponibilidade é limitada e o sistema existente é tecnologicamente atrasado e desorganizado, ocasionando muitas perdas com diversas consequências ambientais. Afirma-se, também, que os preços em relação a esse minério irão aumentar significativamente (AYRES, 2002).

Conforme o *United States Geological Survey* (USGS), em 2014 a produção de cobre dos EUA aumentou 10%, para cerca de 1,37 milhões de toneladas. Em 2014 as reservas mundiais de cobre foram avaliadas em cerca de 2,1 bilhões de toneladas de cobre pórfiro. O Brasil é o décimo quinto maior produtor de minério de cobre. O Chile o maior produtor mundial de cobre com 33,66% do total, seguido pelo Peru, com 7,58%, China com 7,5% e EUA com 6,96% (USGS, 2015). Na figura 10 pode-se verificar o fluxo de produção do cobre.

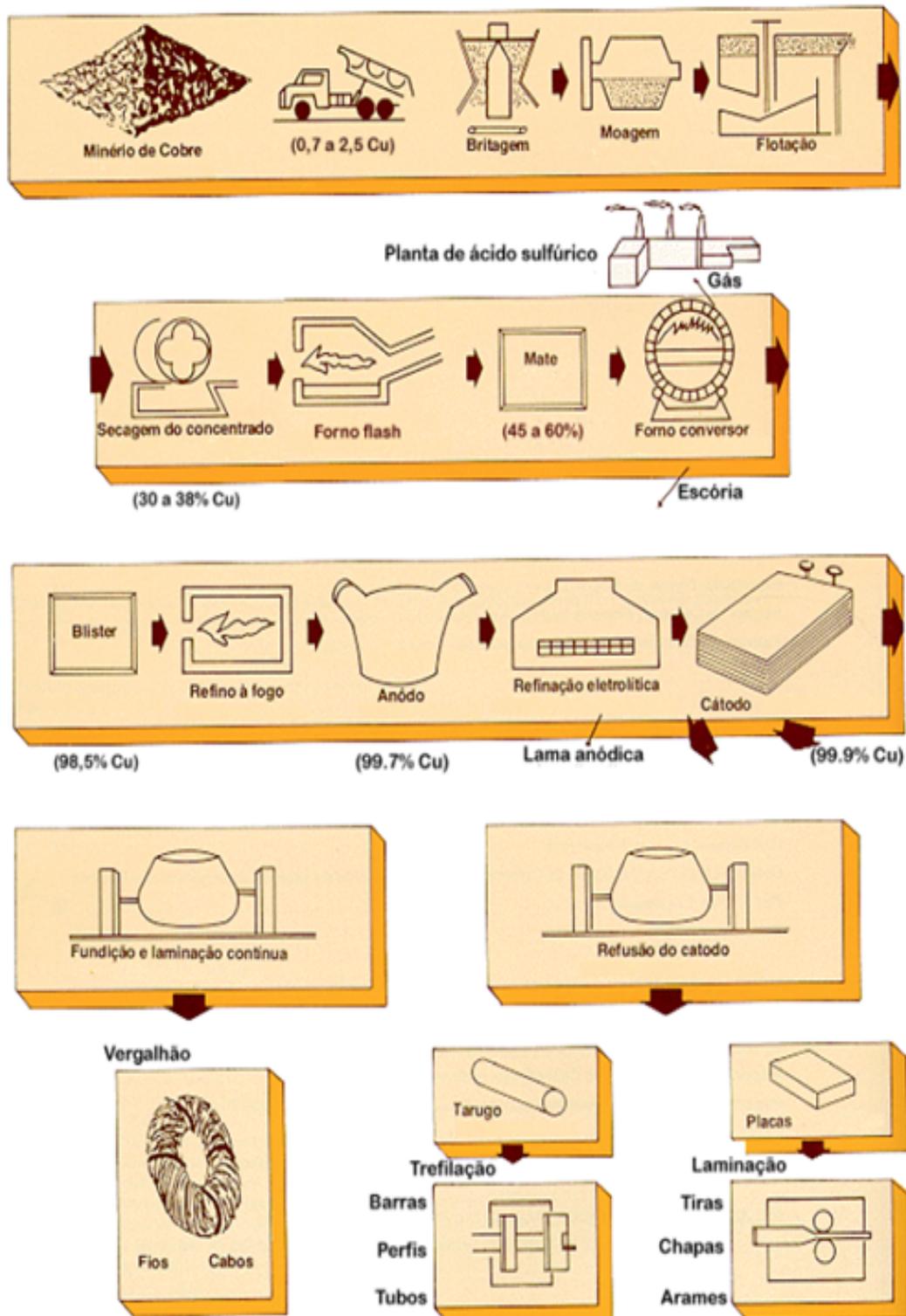


Figura 10 - Fluxo produção do cobre.  
 Fonte: ANDRADE (1997, p. 3).

## 2.4 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo que os persas a 6000 a.C. já fabricavam potes de argila que continham óxido de alumínio. Em 1821 ocorreu a descoberta da bauxita, o minério mais comum de alumínio e, em 1825 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu isolar o alumínio a partir do cloreto de alumínio na forma como é conhecido atualmente (ABAL, 2014).

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico e, a mineração da bauxita deve apresentar no mínimo de 30% de óxido de alumínio (alumina) para que seja viável economicamente. É encontrada principalmente na Austrália, América latina e África. Após extraída, segue para etapas de refinaria e redução, sendo que a redução da alumina calcinada é realizada em cubas eletrolíticas em altas temperaturas no processo conhecido como Hall-Héroukt (ABAL, 2014). A figura 11 representa a cadeia produtiva do alumínio, na produção de condutores de alumínio utilizados nas bobinas transformadores.



Figura 11 - Cadeia produtiva do alumínio.

O maior problema constatado é em relação ao processo de produção do alumínio pois, a produção anual é responsável por 1% das emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2009). Existem estudos a respeito da ACV na produção do alumínio. Alguns, analisam os níveis de emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente devido as diferentes formas de energia utilizada (gás natural, carvão, hidroelétricas). Outros estudos, focam nos níveis de perfluocarbonetos (PFCs) liberados pela indústria do alumínio sob determinadas condições. A conversão da bauxita para a alumina e, o processamento da alumina para o alumínio são processos que consomem muita energia. O método da ACV é ferramenta para “limpar” o

sistema e contribuir para o progresso na produção mais limpa no processo de fabricação do alumínio (TAN; KHOO, 2005). Contudo, existem críticas às avaliações no ciclo de vida na indústria do alumínio. As principais deficiências identificadas referem-se à utilização de dados de inventário genéricos de toda a indústria, com foco na análise apenas das emissões de gases de efeito estufa, fragilidade dos métodos de alocação e reciclagem do alumínio, devendo os referidos pontos serem aprimorados nos estudos (LIU; MULLER, 2012). Conforme Gloria (2013) o potencial de acidificação relacionadas com 1000 kg de produção de lingotes de alumínio primário na América do Norte eleva-se a 56,4 kg SO<sub>2</sub> equivalente. O potencial de eutrofização relacionado com a fabricação de uma tonelada métrica de lingote de alumínio primário na América do Norte chega a 0,97 kg nitrogênio equivalentes. As emissões para a atmosfera (principalmente as emissões de NO<sub>x</sub>), contribui para 86% do total de impactos.

Destaca-se, também, que nem todo o alumínio é produzido de forma igual. Há países que utilizam menos carbono que o material constante nos dados de ICV, como é o caso da Itália (CIACCI, 2014), gerando menos impacto ao meio ambiente. Os fios são considerados produtos semimanufaturados, a partir do qual são enrolados para a obtenção das bobinas.

## **2.5 ACV de transformadores com bobinas de cobre e bobinas de alumínio**

Estudos sobre avaliação do ciclo de vida dos transformadores de distribuição de energia elétrica tem sido feito, principalmente de transformadores de potência. O quadro 1 contém um resumo dos estudos realizados em transformadores pela empresa Asea Brown Boveri (ABB) nas declarações ambientais de produtos (EPD). Estão disponibilizados 07 análises envolvendo transformadores sendo: 01 de transformador de distribuição de 315 kVA; 02 de transformadores de distribuição de 10MVA e 16/20MVA e 04 transformadores de potência de 40/50MVA, 250MVA, 63MVA e 500MVA. Para a elaboração do quadro 1 foi selecionado, aleatoriamente, dois transformadores de distribuição e um transformador de força.

Em artigo publicado na 21<sup>a</sup> Conferência Internacional em Distribuição de Eletricidade (CIRED), foi analisada a ACV do transformador a seco e do imerso em óleo com núcleo amorfo. As conclusões permitem inferir que os núcleos amorfos tem redução significativa de impacto comparada aos transformadores padrão, chegando a 60%, em especial pela redução nos índices de perdas (CARLEN, 2011)

<b>Estudo</b>	EPD (1)	EPD (2)	EPD (3)
<b>Espécie de Estudo</b>	Análise da ACV num transformador de distribuição de 315kVA, 11kV, 3 fases	Análise da ACV num transformador de distribuição de 10 MVA	Análise da ACV num transformador de força 40/50 MVA
<b>Objetivos</b>	Avaliar o impacto num transformador, considerando 30 anos de uso, com perda presumida de 50%	Avaliar o impacto num transformador, considerando 30 anos de uso, com perda presumida de 50%	Avaliar o impacto num transformador, considerando 35 anos de uso, com perda presumida de 50%
<b>Local</b>	Darra, Queensland, Austrália	Padova, Itália	Milano, Itália
<b>Fronteiras do Sistema</b>	Desde a produção da matéria-prima até a reciclagem do material, quando os produtos são retirados de serviço	Considerou todos os aspectos ambientais da extração à produção, transporte e desmantelamento após o fim da vida.	Considerou todos os aspectos ambientais da extração à produção, transporte e desmantelamento após o fim da vida.
<b>Metodologia de avaliação</b>	Tellus e Eco-Indicador 95	Eco-Indicador 95	Eco-Indicador 95
<b>Unidade Funcional</b>	315 kVA	1kVA	1 MVA
<b>Conclusões</b>	As maiores categorias de impacto são na etapa de utilização. As emissões de geração de energia elétrica para cobrir as perdas dos transformadores marcam o maior impacto.	O maior impacto é durante a fase de uso. Na etapa de fabricação o enrolamento de cobre é o que mais contribui para o impacto ambiental.	O maior impacto é na fase de uso. Na etapa de fabricação o enrolamento de cobre é quem contribui mais para a poluição.

Quadro 1 - Resumo das declarações ambientais.

Fonte: Resumo de material extraído do *site* da empresa ABB (EPD 1, 2015; EPD 2, 2015; EPD 3, 2015).

As bobinas dos transformadores de distribuição de até 190 kVA de alumínio tem um custo de produção menor, sendo que, acima dessa potência as de cobre são mais econômicas, utilizando menor tanque, menor quantidade de material de núcleo e de óleo, considerando os preços de novembro de 2009 (OLIVARES-GALVAN, 2010).

### 3 METODOLOGIA

O tema principal da pesquisa é a ACV das bobinas manufaturadas com fios de cobre e das bobinas com fios de alumínio nos transformadores de distribuição imerso em líquido isolante, limitando-se à análise nas etapas da extração do cobre e do alumínio à produção dos transformadores com bobinas de cobre e com bobinas de alumínio, caracterizando o sistema *cradle to gate* (do berço ao portão), como representado na figura 12.

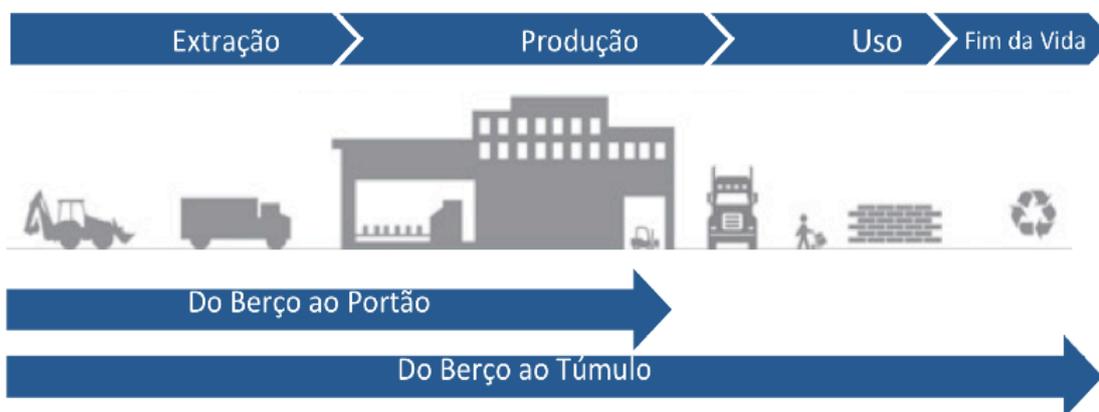


Figura 12 - Representação das fases do ciclo de vida.  
Fonte: Adaptada de Calstar Products (2014).

A ACV tem sido utilizada em projetos para a fabricação de diferentes produtos a fim de minimizar os impactos ambientais. A partir desta situação aborda-se o estudo da ACV em bobinas de cobre e de alumínio em dois transformadores de distribuição.

A pesquisa pode ser classificada quanto: a natureza, a forma de abordagem, aos seus objetivos e, aos procedimentos técnicos. Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, buscando conhecimentos para aplicação prática. A forma de abordagem é quantitativa, traduzindo em números as informações para classificação e análise (SILVA, 2005). Quanto ao objetivo, classifica-se como exploratória, envolvendo levantamento bibliográfico e estudo de caso (GIL, 2010). Do ponto de vista dos procedimentos técnicos esta pesquisa usa: a) pesquisa bibliográfica, utilizando-se dados publicados em livros e artigos; b) pesquisa de documentos e relatórios particulares da empresa onde ocorreu o estudo; e, c) de estudo de caso envolvendo a análise de ACV em dois transformadores de distribuição sendo um com bobina confeccionada com fios de cobre e, o outro, com bobina confeccionada com

fos de alumínio. A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa compreendeu as três etapas apresentadas na figura 13.

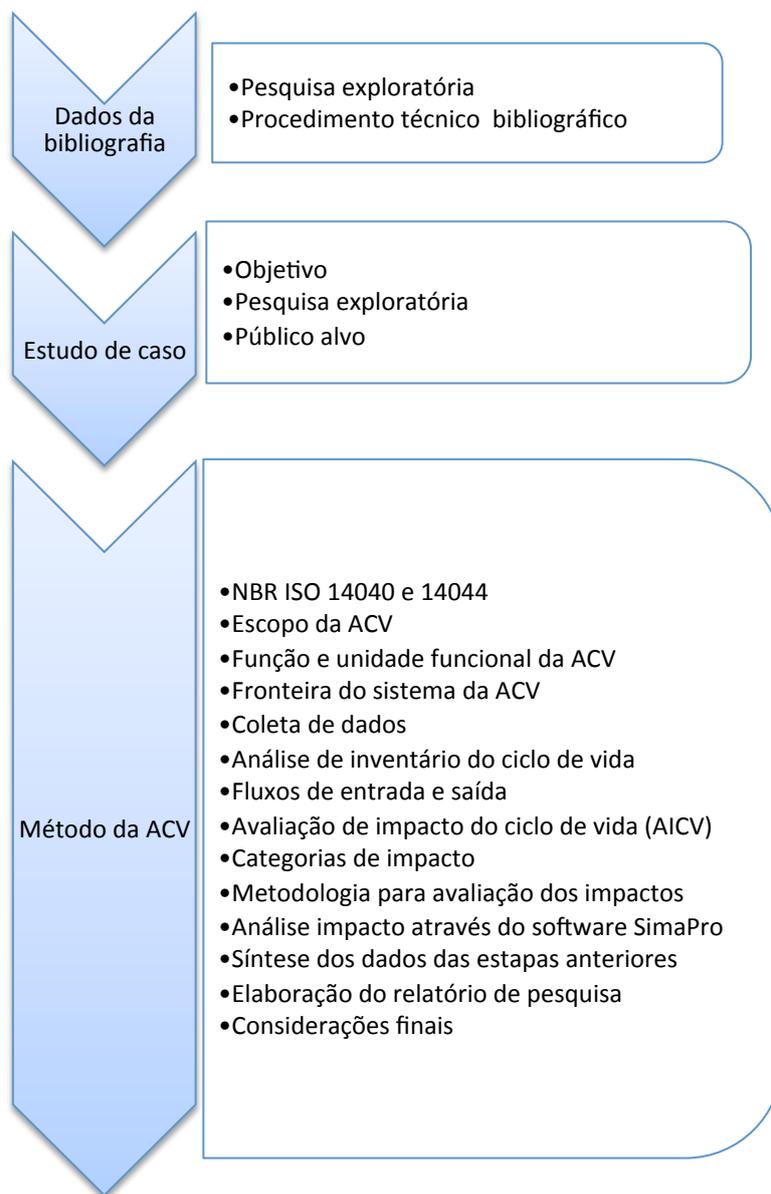


Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa.

### 3.1 Obtenção de dados pela bibliografia

A revisão bibliográfica teve como objetivo fundamentar conceitos e estratégias da avaliação do ciclo de vida e verificar o estado da arte. Foram realizadas pesquisas em periódicos específicos, livros técnicos, artigos publicados em anais de congressos e em *sites* institucionais.

Nesta etapa o objetivo da pesquisa foi exploratório e o procedimento técnico foi bibliográfico (GIL, 2010). O levantamento compreendeu: ACV (panorama geral, conceitos, classificação) e ICV (inventário do ciclo de vida) de dois transformadores de distribuição, um com bobinas de alumínio e outro com bobinas de cobre.

### 3.2 Estudo de caso

O estudo de caso foi realizado na empresa Polo Electro de transformadores situada no município de Santa Maria/RS. A empresa está no mercado de fabricação de transformadores desde 1996. Atualmente, produz em média 250 unidades por mês. A maior parte dos transformadores produzidos são de potência de 45 kVA a 150 kVA, utilizando tanto bobinas de cobre quanto de alumínio, sendo a preferência pelo alumínio em razão dos aspectos financeiros.

O objetivo do presente estudo de caso é complementar a teoria existente (MIGUEL, 2012) identificando qual das bobinas, objeto de análise, gerou menor impacto ambiental. Esta etapa foi exploratória (GIL, 2010), envolveu estudo e levantamento que visou ao descobrimento de novas características no ramo estudado. No estudo de caso aplicou-se a ACV nas bobinas de alumínio e de cobre utilizadas em dois transformadores de distribuição, caracterizando-se como estudo de caso longitudinal que investiga o presente buscando determinar relações de causa e efeito (MIGUEL, 2012).

Conforme Gil (2010) a definição da unidade caso é a etapa que deve ser seguida em estudo de caso. A definição das amostras foi pela potência média dos transformadores comercializados no ano de 2014 na empresa em que o estudo foi desenvolvido. Para isso, foram utilizados relatórios de vendas da empresa. O público alvo da pesquisa são indústrias fabricantes de transformadores, concessionárias de energia e consumidores.

### 3.2.1 Fabricação dos transformadores

Dois transformadores foram fabricados a fim de viabilizar os ensaios finais (Apêndices C e D) para validar a unidade funcional escolhida. Também, para verificar e confirmar os fluxos de referência. O processo foi dividido em 08 etapas: a) fabricação de bobinas de baixa tensão ou enrolamento secundário (Figura 14); b) fabricação de bobinas de alta tensão ou enrolamento primário (Figura 15); c) montagem do núcleo de aço silício (Figura 16); d) fabricação do tanque (Figura 17); e) enrolamento e ligação elétrica do transformador de alumínio (Figura 18); f) enrolamento e ligação elétrica do transformador de cobre (Figura 19); g) pintura eletrostática; h) montagem final (Figura 20); i) ensaios finais e expedição (Figura 21).

No processo de bobinagem os equipamentos utilizados foram: guilhotina para papelão, máquina de corte de papel, máquina de enrolamentos de tubos de papel, máquina bobinadeira para baixa tensão e máquina bobinadeira para alta tensão.



Figura 14 - Processo fabricação bobinas baixa tensão.



Figura 15 - Processo fabricação bobinas de alta tensão.

No processo de montagem do núcleo os equipamentos utilizados foram: guilhotina reta, guilhotina 45°, guilhotina “V”, mesa de montagem de núcleo e carro de transporte.



Figura 16 - Processo montagem de núcleo de silício.

No processo de fabricação dos tanques, os equipamentos da caldeiraria utilizados foram: mesa de corte plasma CNC, calandra, dobradeira, esteiras, talhas elétricas, máquina de solda *mig*, serra a disco para tubos, prensa com matriz e dobradeira de tubos.



Figura 17 - Processo de fabricação de tanque.

No processo de enrolamento e ligações elétricas utilizou-se: esteira, prensa hidráulica para terminais, solda oxi-acetileno e parafusadeira pneumática.



Figura 18 - Enrolamento e ligação elétrica do transformador de alumínio.