

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

CAMPUS DE SANTA BÁRBARA D'OESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA A
PARTIR DO USO DA LOGÍSTICA REVERSA VISANDO REDUZIR OS
IMPACTOS NO USO DE INSUMOS DE MANUFATURA: O CASO DOS
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Everton Dias de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Milton Vieira Júnior

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Santa Bárbara d'Oeste,

2021

MODELO DE APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA A PARTIR DO USO DA LOGÍSTICA REVERSA VISANDO REDUZIR OS IMPACTOS NO USO DE INSUMOS DE MANUFATURA: O CASO DOS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Everton Dias de Oliveira

Defesa de Doutorado, fevereiro de 2021, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Milton Vieira Junior – Presidente da Banca.
(PPGEP - Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP).

Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana
(PPGEP – Universidade Federal do ABC).

Prof^a. Dr^a. Regina Marcia Longo
(PPG-Sustentabilidade e PPGSPINFRA - Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUC-CAMPINAS).

Prof. Dr. Daniel Luis Garrido Monaro
(PPGEP - Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP).

Prof. Dr. Remo Augusto Padovezi Filleti
(PPGEP - Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP).

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, pela minha existência e por guiar os meus caminhos;

À Universidade Metodista de Piracicaba, pela infraestrutura oferecida;

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa durante todo o período do curso de Doutorado entre os anos de 2017 - 2020;

Ao Professor Doutor Milton Vieira Junior, por me aceitar como seu orientado, pela orientação e apoio durante a construção do trabalho pela motivação e confiança depositada durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Doutor Aparecido dos Reis Coutinho, pela orientação na fase inicial.

Aos meus pais, familiares e amigos próximos que mesmo nem sempre entendendo este caminho acadêmico que escolhi, respeitaram a minha decisão;

Aos colegas e amigos que fiz na instituição durante este ciclo;

À Marta Helena Teixeira Bragaglia, secretária do PPEGP, cartão de visita do Programa e peça chave para o bom funcionamento das atividades.

“Se podemos sonhar, também podemos tornar nossos sonhos realidade”.

– Walt Disney.

OLIVEIRA, Everton Dias de . **MODELO DE APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA A PARTIR DO USO DA LOGÍSTICA REVERSA VISANDO REDUZIR OS IMPACTOS NO USO DE INSUMOS DE MANUFATURA: O CASO DOS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.** 2021. 253f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

Resumo

As ações dos processos produtivos, bem como o montante da produção mundial de diversos tipos de produtos, são traduzidas basicamente pelo consumo de matérias primas e de energia. O aumento do consumo dos recursos naturais e de eletricidade em processos de manufatura têm como consequência a elevação dos índices de poluição do solo, do ar, dos mares e dos rios. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor um modelo de aplicação da avaliação do ciclo de vida a partir do uso da logística reversa visando reduzir os impactos no uso de insumos de manufatura: o caso dos transformadores elétricos de potência. O método empregado no presente trabalho foi estruturado com base nos conceitos e normas da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Logística Reversa (LR), incluindo-se a coleta de dados, construção do inventário do ciclo de vida e a modelagem computacional. A unidade funcional: um transformador de potência de 10kVA (102,215kg) e um transformador de 30kVA (263,205kg), utilizados na distribuição de Energia Elétrica em rede de baixa tensão, considerando a produção dos seguintes materiais aço carbono, alumínio, cobre, papel e silício. Principais resultados: Assim os principais dados encontrados para cada transformador elétrico de potência em nível *midpoint* foram: Mudanças Climáticas 2,79E+12kg CO₂ eq (10kVA) e 7,18E+12kg CO₂ eq (30kVA); Toxicidade Humana 2,72E+14kg 1,4- DB eq (10kVA) e 6,99E+1414kg 1,4- DB eq (30kVA); Radiação Ionizante 1,29E+10kg U235 eq (10kVA) e 3,31E+10 kg U235 eq (30kVA); Depleção do Ozônio 2,62E+04kg CFC -11 eq (10kVA) e 6,74E+04kg CFC -11 eq (30kVA); Acidificação Terrestre 2,89E+09kg SO₂ eq (10kVA) e 7,43E+09kg SO₂ eq (30kVA); Depleção da Água 2,07E+10m³ (10kVA) e 5,33E+10m³ (30kVA). Já para as 2 potenciais categorias de impacto ambiental em nível *endpoint* os dados são: Saúde Humana - Mudanças Climáticas 3,32E+06DALY (10kVA) e 8,54E+06DALY (30kVA); Saúde Humana - Depleção do ozônio 1,09E+01 DALY (10kVA) e 2,80E+01 DALY (30kVA). Todos os valores apresentados nas potenciais categorias de impacto ambiental informam e alertam que o acumulado exercício das atividades para manufatura de produto aumentam os índices de emissão de poluentes na atmosfera degradando a qualidade do ar, provocando aquecimento global, mudanças climáticas, erosão do solo, poluição hídrica dentre outros problemas.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida, Logística Reversa, Transformador Elétrico de Potência.

OLIVEIRA, Everton Dias de. **MODEL OF APPLICATION OF THE LIFE CYCLE ASSESSMENT FROM THE USE OF REVERSE LOGISTICS AIMING TO REDUCE THE IMPACTS IN THE USE OF MANUFACTURING INPUTS: THE CASE OF ELECTRIC POWER TRANSFORMERS.** 2021. 253f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

Abstract

The actions of the production processes, as well as the amount of world production of different types of products, are basically translated by the consumption of raw materials and energy. The increase in consumption of natural resources and electricity in manufacturing processes has the consequence of increasing the levels of pollution of the soil, air, seas and rivers. In this context, the present work aims to propose a model for the application of life cycle assessment based on the use of reverse logistics to reduce the impacts on the use of manufacturing inputs: the case of electric power transformers. The method employed in the present work was structured based on the concepts and standards of Life Cycle Assessment (LCA) and Reverse Logistics (LR), including whether data collection, construction of the life cycle inventory and computational modeling. The functional unit: a 10kVA (102,215kg) power transformer and a 30kVA (263,205kg) transformer, used in the distribution of Electricity in a low voltage network, considering the production of the following materials: carbon steel, aluminum, copper, paper and silicon. Main results: Thus, the main data found for each midpoint level electrical transformer were: Climate Change $2.79E + 12$ kg CO₂ eq (10kVA) and $7.18E + 12$ kg CO₂ eq (30kVA); Human Toxicity $2.72E + 14$ kg 1.4- DB eq (10kVA) and $6.99E + 14$ 14kg 1.4- DB eq (30kVA); Ionizing Radiation $1.29E + 10$ kg U235 eq (10kVA) and $3.31E + 10$ kg U235 eq (30kVA); Ozone depletion $2.62E + 04$ kg CFC -11 eq (10kVA) and $6.74E + 04$ kg CFC -11 eq (30kVA); Terrestrial acidification $2.89E + 09$ kg SO₂ eq (10kVA) and $7.43E + 09$ kg SO₂ eq (30kVA); Water Depletion $2.07E + 10$ m³ (10kVA) and $5.33E + 10$ m³ (30kVA). For the 2 potential categories of environmental impact at the endpoint level, the data are: Human Health - Climate Change $3.32E + 06$ DALY (10kVA) and $8.54E + 06$ DALY (30kVA); Human Health - Ozone depletion $1.09E + 01$ DALY (10kVA) and $2.80E + 01$ DALY (30kVA). All values presented in the potential categories of environmental impact inform and warn that the accumulated exercise of activities for product manufacture increases the emission rates of pollutants in the atmosphere, degrading the air quality, causing global warming, climate changes, soil erosion, pollution water among other problems.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment, Reverse Logistic, Electric Power Transformer.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	21
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 OBJETO DE ESTUDO, DELIMITAÇÃO	24
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	24
1.5 METODOLOGIA E <i>OUTLINE</i> DA PESQUISA	25
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2. REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1 PROTOCOLO PARA CONDUÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1.1 VARREDURA HORIZONTAL	32
2.1.2 VARREDURA VERTICAL	33
2.2 SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	39
2.2.1 APLICAÇÕES DO CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE	41
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV	48
2.3.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA	52
2.3.2 <i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO EM ACV	61
2.4 APLICAÇÕES DA ACV	63
2.5 MODELOS DE SUSTENTABILIDADE	73
2.6 LOGÍSTICA REVERSA - LR	87
2.7 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	94
3. MÉTODO DE PESQUISA	101
3.1 OS ESTUDOS DE CASO	103
3.2 MÉTODO DE ACV	105
3.2.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	105
3.2.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	105

3.2.3 USO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL	107
3.2.4 INTERPRETAÇÃO	108
3.2.5 FRONTEIRAS DO SISTEMA	109
3.2.6 LIMITE GEOGRÁFICO, TEMPORAL E TECNOLÓGICO	109
3.2.7 FLUXO DE REFERÊNCIA, FUNÇÃO DO SISTEMA E UNIDADE FUNCIONAL	110
3.2.8 SISTEMA DO PRODUTO	110
3.2.9 – COLETA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	112
3.2.10 ESTRUTURA DE MONTAGEM DA LOGÍSTICA REVERSA	112
4. PROPOSTA DE MODELO	115
4.1 CARACTERÍSTICAS PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE ACV PARA OS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	115
4.2 FLUXO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	116
4.3 PROPOSTA DO MODELO	119
4.3.1 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DO MODELO	122
5. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	149
5.1 PRODUÇÃO E USO DOS INSUMOS - BLOCO I	149
5.2 FIM DO CICLO DE VIDA DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA E PROBLEMAS GERADOS (INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA) - BLOCO II	155
5.3 APLICAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA - BLOCO III	162
5.1.1 CENÁRIO DE LR E RECICLAGEM DE MATERIAIS	162
5.1.2 LOGÍSTICA REVERSA DE TRANSFORMADORES (PROCESSOS INTERNOS PARA AS EMPRESAS DO ESTUDO DE CASO)	165
5.1.3 REFORMA DE TRANSFORMADORES (PROCESSOS INTERNOS PARA AS EMPRESAS DO ESTUDO DE CASO)	166
5.3 AVALIAÇÃO – BLOCO IV	168
6. Conclusão	194
Referências	197
Apêndice	226

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA PESQUISA GERAL.....</i>	<i>27</i>
<i>FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA METODOLÓGICA.....</i>	<i>28</i>
<i>FIGURA 3 – OUT-LINE DA PESQUISA.....</i>	<i>29</i>
<i>FIGURA 4 - ESTRUTURA DO TRABALHO.....</i>	<i>31</i>
<i>FIGURA 5 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS AO LONGO DOS ANOS.....</i>	<i>36</i>
<i>FIGURA 6 – GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE ARTIGOS ACEITOS POR BASE DE DADOS.....</i>	<i>37</i>
<i>FIGURA 7 – PERIÓDICOS E REVISTAS COM PUBLICAÇÕES SUPERIORES A UM.....</i>	<i>38</i>
<i>FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DE PUBLICAÇÕES POR AUTOR.....</i>	<i>39</i>
<i>FIGURA 9 – GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE.....</i>	<i>40</i>
<i>FIGURA 10 – ESTRUTURA DA ACV. FONTE: ADAPTADO ISO14040.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA 11 - VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DO CICLO DE VIDA (ADAPTADO KOBAYASHI, 2018).....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA 12 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO ECO-INCATOR 99 (FONTE: ADAPTADO DE DREYER ET AL., 2003).....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA 13 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO CML 2002 (FONTE: ADAPTADO FRISCHKNECHT ET AL., 2003).....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA 14 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO RECIPE (FONTE: ADAPTADO ACERO ET AL., 2014).....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 15 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO IMPACT 2002+ (FONTE: ADAPTADO, SOARES ET AL., 2006).....</i>	<i>58</i>
<i>FIGURA 16 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO IMPACT WORLD+ (FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).....</i>	<i>59</i>
<i>FIGURA 17 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO LUCAS (FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).....</i>	<i>60</i>
<i>FIGURA 18 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO LIME (FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).....</i>	<i>61</i>

<i>FIGURA 19 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS POR ANO.....</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 20 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS ENTRE AS BASES DE DADOS.....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 21 – GRÁFICO COM A DISTRIBUIÇÃO DAS REVISTAS.</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 22 – GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE, PARA SEGUNDA PARTE DA RSL.....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 23 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS AO LONGO DOS ANOS NO TEMA ACV E LR.</i>	<i>90</i>
<i>FIGURA 24 - PERIÓDICOS E REVISTAS COM PUBLICAÇÕES SUPERIORES A UM NO TEMA ACV E LR.....</i>	<i>91</i>
<i>FIGURA 25– GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE, PARA ACV E LR.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 26 – Comportamento do fluxo magnético no transformador. Fonte: Alcântara (2012).....</i>	<i>97</i>
<i>FIGURA 27 – TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA GENÉRICO (ADAPTADO: PAUWELS GROUP, 2018).</i>	<i>99</i>
<i>Figura 28 – Parte Ativa do Transformador de Potência genérico (Adptado Pauwels Group, 2018).....</i>	<i>100</i>
<i>FIGURA 29– ESTRUTURA PROCEDIMENTAL DO MÉTODO.....</i>	<i>102</i>
<i>FIGURA 30– ESTRUTURAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS (MIGUEL, 2007).....</i>	<i>105</i>
<i>FIGURA 31 - FLUXO DO PROCEDIMENTO DE MONTAGEM DO ICV (ABNT/ISO 14044-2014).</i>	<i>107</i>
<i>FIGURA 32 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PRODUTO.....</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 33– SÍNTESE DAS ATIVIDADES PARA ELABORAÇÃO DO MODELO.....</i>	<i>114</i>
<i>FIGURA 34– ESTRUTURA GERAL DE CONCEPÇÃO GERAL PARA PRODUTO OU PROCESSO. ADAPTADO (YANG ET AL, 2017 E CHIAVENATO, 2011).....</i>	<i>116</i>
<i>FIGURA 35 – PROCESSO MACRO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO/PROCESSO. ADAPTADO (ROZENFELD ET AL, 2006).....</i>	<i>117</i>
<i>FIGURA 36 - FLUXO GERAL DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO ESTRATIFICADO. ADAPTADO (ROZENFELD ET AL, 2006).....</i>	<i>118</i>
<i>FIGURA 37– ESTRUTURA LINEAR INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE PRODUTO. ADAPTADO (WINANS, KENDALL & DENG, 2017).....</i>	<i>119</i>

<i>FIGURA 38 – ESTRUTURA CIRCULAR INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE PRODUTO. ADAPTADO (POLVERINI & MIRETTI, 2019).....</i>	<i>120</i>
<i>FIGURA 39 – PROPOSTA DE MODELO PARA ACV DE PRODUTO NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR.....</i>	<i>121</i>
<i>FIGURA 40 – PROPOSTA DE MODELO PARA ACV COM O USO DA LR DE PRODUTO.....</i>	<i>123</i>
<i>FIGURA 41 – COMPONENTES DO BLOCO I.</i>	<i>124</i>
<i>FIGURA 42 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO COBRE.</i>	<i>125</i>
<i>FIGURA 43 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO SÍLÍCIO.....</i>	<i>127</i>
<i>FIGURA 44 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO AÇO.....</i>	<i>128</i>
<i>FIGURA 45 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO.....</i>	<i>129</i>
<i>FIGURA 46 - FLUXO DE PRODUÇÃO DO PAPEL.....</i>	<i>131</i>
<i>FIGURA 47 – BLOCO II.....</i>	<i>132</i>
<i>FIGURA 48 – COMPONENTES DO BLOCO III.....</i>	<i>138</i>
<i>FIGURA 49 – FLUXO DO SISTEMA EM CADEIA FECHADA DO SLR.....</i>	<i>139</i>
<i>FIGURA 50 - CATEGORIZAÇÃO DAS FASES DO SLR PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....</i>	<i>140</i>
<i>FIGURA 51: PROCESSOS DO SLR.....</i>	<i>141</i>
<i>FIGURA 52: PROCESSOS DO SLR PARA REE.....</i>	<i>142</i>
<i>FIGURA 53 – COMPONENTES DO BLOCO IV.....</i>	<i>143</i>
<i>FIGURA 54 – SÍNTESE DO MODELO PROPOSTO E SUAS INFORMAÇÕES.....</i>	<i>149</i>
<i>FIGURA 55 – AVALIAÇÃO DO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR.....</i>	<i>152</i>
<i>FIGURA 56 – VARIÁVEIS GERAIS DA ACV PARA TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....</i>	<i>153</i>
<i>FIGURA 57 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO REFERENTE AO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, 10 KVA.....</i>	<i>157</i>
<i>FIGURA 58 – RELAÇÃO PERCENTUAL DOS MATERIAIS PRESENTES NO TRANSFORMADOR DE 10 KVA.....</i>	<i>159</i>
<i>FIGURA 59 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO REFERENTE AO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, 30KVA.....</i>	<i>160</i>
<i>FIGURA 60 - RELAÇÃO PERCENTUAL DOS MATERIAIS PRESENTES NO TRANSFORMADOR DE 30 KVA.....</i>	<i>162</i>

<i>FIGURA 61 – CENÁRIO DE LR E RECICLAGEM PARA OS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....</i>	<i>164</i>
<i>FIGURA 62 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA LR DE TRANSFORMADORES.....</i>	<i>166</i>
<i>FIGURA 63 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA REFORMA DO TRANSFORMADOR.....</i>	<i>168</i>
<i>FIGURA 64 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....</i>	<i>172</i>
<i>FIGURA 65 – TOXICIDADE HUMANA.....</i>	<i>173</i>
<i>FIGURA 66 – RADIAÇÃO IONIZANTE.....</i>	<i>174</i>
<i>FIGURA 67 – ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE.....</i>	<i>176</i>
<i>FIGURA 68 – DEPLEÇÃO DO OZÔNIO.....</i>	<i>177</i>
<i>FIGURA 69 – DEPLEÇÃO DA ÁGUA.....</i>	<i>178</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Unidade de medida da Corrente Elétrica

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos

ACVC - Avaliação do Ciclo de Vida das Cidades

ACVE - Avaliação do Ciclo de Vida Energético

ACVIC - Avaliação do Ciclo de Vida de Infraestrutura e Construções

ACVS - Avaliação do Ciclo de Vida Social

AICV - Inventário do Ciclo de Vida

CA - Corrente Alternada

CML - Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden

Cnumad - Conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento

Cu – Cobre

EE – Energia Elétrica

ER - Engenharia Reversa

FEM - Forma Eletromotriz

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

IEA - *International Energy Agency*

LAPES - Laboratório de Pesquisas em Engenharia de Software

LCA - Life Cycle Assessment

LR - Logística Reversa

MDL - Mecanismo do Desenvolvimento Limpo

REEE - Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos

RSL - Revisão Sistemática de Literatura

SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

Si - Silício

SIN - Sistema Interligado Nacional

SLR – Sistema de Logística Reversa

TBL - *Triple Botton Line*

TNO - Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

V - Nível de Tensão

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sustentabilidade.....	43
Tabela 2 – Sustentabilidade Energética.....	47
Tabela 3 - ACV na Engenharia Civil.....	65
Tabela 4 – ACV na Energia.....	67
Tabela 5 – ACV na Manufatura.....	69
Tabela 6 – ACV Materiais.....	72
Tabela 7 – ACV Teoria.....	73
Tabela 8 – Modelos de Sustentabilidade.....	79
Tabela 9 – Modelos em Ecoeficiência.....	83
Tabela 10 – Modelos em <i>Design</i> Sustentável.....	85
Tabela 11 – Modelos em Cadeia de Suprimentos.....	86
Tabela 12 – ACV e LR.....	92
Tabela 13 - Principais Tipos de Transformadores de Potência.....	97
Tabela 14 - Principais Tipos de Perdas nos transformadores.....	98
Tabela 15 – Processos considerados para Construção do ICV.....	146
Tabela 16 – Lista de Unidade de Medida por Processo.....	148
Tabela 17 – Valores de referência para quantidade de massa e consumo de eletricidade (kg/kWh)	154
Tabela 18 – Dados de Massa e Consumo de Eletricidade (Bloco I)	154
Tabela 19 – Consumo de eletricidade empregado na montagem dos transformadores.....	155
Tabela 20 - Balanço de massa do transformador monofásico 10Kva.....	158
Tabela 21 - Balanço de massa do transformador trifásico de 30kVA.....	161
Tabela 22 – Potenciais Impactos ambientais por categoria em nível <i>midpoint</i> ..	171
Tabela 23 - Potenciais Impactos ambientais por categoria em nível <i>endpoint</i> ..	179

Tabela 24 - Cenário de reciclagem do Alumínio.....	181
Tabela 25 - Cenário de reciclagem do Aço Carbono.....	182
Tabela 26 - Cenário de reciclagem do Cobre.....	183
Tabela 27 – Cenário de reciclagem do Papel.....	184
Tabela 28 - Cenário de reciclagem do Silício.....	185

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Strings de busca para seleção das palavras-chave.....	33
Quadro 2 – Índice de repetições das palavras-chave encontradas.....	34
Quadro 3 – Strings de busca associadas.....	35
Quadro 4 – Critérios de seleção.....	35
Quadro 5 – Informações dos Métodos de Impacto Ambiental.....	62
Quadro 6 – Informações dos <i>Softwares</i> de Simulação Computacional.....	64
Quadro 7 – <i>String</i> de busca associadas.....	74
Quadro 8 – <i>String</i> de busca relacionada a ACV e LR.....	90
Quadro 9 - Atividades do protocolo de coleta e compilação dos dados.....	152
Quadro 10 – Descrição das Unidades de Medida.....	170
Quadro 11 – Ações para o tratamento de Emissões Atmosféricas.....	192

1. INTRODUÇÃO

O mercado atual tem como um dos seus aspectos de interesse o desenvolvimento da competitividade entre indústrias, produtos, serviços, em que os clientes escolhem, dentre as opções disponíveis, as que mais se adequam aos requisitos por eles buscados, podendo ser: *design*, valor de mercado, características de funcionamento, materiais empregados na manufatura, consumo de energia elétrica durante a fabricação, qualidade, segurança e sustentabilidade (UDOKPORO et al., 2020).

O aprimoramento da tecnologia manufatureira industrial e eletrônica permitiu, e vem permitindo desde a segunda revolução industrial, que muitas empresas, indústrias e instituições construam produtos dos mais variados tipos, formatos e aplicações, atendendo às necessidades atuais dos indivíduos (PARANHOS, 2016).

Com isso, o processo de manufatura é aprimorado constantemente, mediante os avanços da tecnologia, contribuindo para implantação de linhas de produção mais eficientes, encarregadas de atender a uma vasta gama de produtos em vários setores (RODERBURG, KLOCKE e KOSHY, 2011).

Os padrões de qualidade da atualidade são apontados como fatores que contribuem para a evolução dos processos produtivos, uma vez que as especificações das agências reguladoras determinam ações para o processo de fabricação, levando em consideração a segurança do operador, do cliente final, recursos naturais e resíduos (SMETKOWSKA e MRUGALSKA, 2018).

As ações dos processos produtivos, bem como o montante da produção mundial de diversos tipos de produtos, são traduzidas basicamente pelo consumo de matérias primas e de energia. Com relação às matérias primas, o processo de extração dos recursos naturais é um dos pontos iniciais para o desenvolvimento de qualquer projeto que envolva manufatura (GONZÁLES-VAL e PUEYO, 2019).

O aumento do consumo dos recursos naturais e de eletricidade em processos de manufatura têm como consequência a elevação dos índices de poluição do

solo, do ar, dos mares e dos rios, surgindo assim o interesse por criar e desenvolver métodos e técnicas para avaliar o nível de sustentabilidade dos produtos e medidas de ecoeficiência (SLOMSKI *et al.*, 2012).

O padrão de sustentabilidade é definido com base no conceito de *Triple Bottom Line (TBL)*, nomenclatura também conhecida como o tripé da sustentabilidade, que considera os seguintes aspectos: ambiental, econômico e social. O TBL orienta empresas e instituições a praticarem o uso consciente dos recursos naturais, ao mesmo tempo em que promovem formas mais eficientes de produção, que possibilitem a redução dos custos produtivos e que viabilizem retorno financeiro adequado (lucro) dos produtos/serviços ofertados pelo empreendimento. Para além disso, o TBL promove a implementação de condições de trabalho honestas aos colaboradores das empresas, bem como na preservação das comunidades e do meio ambiente nas vizinhanças das instalações produtivas (ELKINGTON, 2013).

Outra forma de estratégia ambiental de produtos é a aplicação do conceito dos 10Rs (recusar, repensar, reduzir, reusar, reparar, recondicionar, remanufaturar, ressignificar, reciclar e recuperar), apoiando assim a transição da economia linear para a economia circular, diminuindo o uso dos recursos naturais e dos potenciais impactos ambientais relacionado ao ciclo de vida do produto (POTTING *et al.*, 2017).

A diminuição do uso de recursos naturais e da geração de resíduos é apontada no conceito de ecoeficiência também como vantagem competitiva no âmbito da sustentabilidade, destacando a existência de ganhos econômicos perante os concorrentes, uma vez que o mercado tenha dado relevância para os fatores ambientais (FRANÇA *et al.*, 2010).

Nesse sentido, e paralelamente, tem aumentado o interesse em avaliar o ciclo de vida dos produtos e dos processos de Logística Reversa (LR), visando obter maior eficiência dos processos produtivos quanto ao uso dos recursos naturais e ao consumo de energia elétrica, o que reflete diretamente nos impactos ambientais causados à natureza (BRANDER *et al.*, 2019).

A energia elétrica, por sua vez, é considerada fundamental na sociedade de consumo atual e está intimamente ligada ao desenvolvimento econômico, em especial ao desenvolvimento industrial, pois foi a mola propulsora da segunda revolução industrial (SCHWAB, 2019). Prova disso é o vertiginoso aumento do consumo mundial de energia elétrica por parte da indústria desde o início do século 21, passando de ~5,4TWh em 2000, para ~8,9TWh em 2017, representando crescimento de 65,7% em 17anos (IEA, 2019).

O aumento do consumo de energia elétrica naturalmente demanda uma estrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica capaz de atender a demanda existentes para a gama crescente de consumidores e quanto maior for essa demanda de geração de eletricidade maior será a quantidade de equipamentos (elementos) necessários para promover o acesso à eletricidade para os consumidores.

Tratando de forma mais específica sobre o sistema de distribuição de energia elétrica para os consumidores, o equipamento que se destaca como um dos elementos da rede responsáveis pela distribuição de energia elétrica é o transformador elétrico, que pode ser encontrado em várias fases do processo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O transformador é o elemento do sistema de transmissão encarregado de alterar o nível de tensão (V) e corrente (A) de entrada do sistema para outro valor, maior ou menor, em sua saída. Trata-se, portanto, de um equipamento largamente utilizado e importante no sistema de transmissão (ABEYSINGHE et al., 2017).

No caso específico do transformador elétrico, sua produção industrial envolve diversos tipos de matérias primas que são oriundas da extração de recursos naturais, como: cobre, silício, aço carbono, alumínio, papel e cerâmica (JIA et al., 2018). O processo de fabricação do transformador, desde a fase de extração de materiais até a sua manufatura, é caracterizado pelo alto consumo de energia elétrica e de insumos com origem não-renovável, ou seja, provenientes de fontes esgotáveis da natureza. Tais características estão intimamente associadas à considerável geração de poluição e, por consequência, de impactos ambientais dos mais variados tipos. De acordo com Tavares et al. (2008), estratégias mais sustentáveis de fim-de-vida do transformador, como reutilização/reciclagem de

seus materiais, podem minimizar o efeito de tais impactos, ao se evitar a extração de nova matéria prima e de consumo de eletricidade.

Os aspectos relacionados à produção, assim como ao fim de vida, são abordados pela ferramenta de gestão ambiental denominada Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste na compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida, englobando as fases de extração e beneficiamento das matérias primas, produção de energia elétrica, manufatura, uso e fim-de-vida (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b; ARVANITTOYANNIS, 2008).

Os transformadores elétricos de potência, como mencionado anteriormente, são constituídos de recursos não renováveis, tendo em sua composição grande parte de materiais como cobre e silício, elementos com grande quantidade de emissão de poluentes na atmosfera principalmente na fase de extração da matéria prima, seguida das fases de beneficiamento, de manufatura do produto e, em sua fase final de ciclo de vida, do acúmulo do descarte de resíduos em aterros ou até mesmo em áreas não apropriadas para o descarte correto. São projetados para uma vida útil de 70 anos em regime de operação, mas no entanto, as concessionárias de energia elétrica utilizam efetivamente os transformadores por 35 anos, de modo que perdem o valor de utilização no mercado e, na maioria dos casos, estes equipamentos são descartados sem nenhuma avaliação prévia (DI CAPUA e FEMIA, 2018).

Assim, a reutilização de materiais já processados dentro de uma cadeia produtiva passou a ser uma alternativa para diminuir a extração dos recursos naturais, bem como para diminuir o consumo de energia elétrica e minimizar emissões de carbono para atmosfera (BUI e VILLIERS, 2017). Dessa forma, faz-se importante conhecer e controlar o ciclo de vida dos transformadores de potência da rede elétrica de distribuição de eletricidade.

Essa ação de reutilizar materiais já existentes, também é potencializada e caracterizada pela LR, cujo conceito defende que o planejamento do uso e a implantação de controle de fluxos de produtos e materiais acabados contribuem para gerar valor para as matérias primas já retiradas da natureza e utilizadas,

prolongar a vida útil dos materiais e efetuar o descarte pós consumo de maneira adequada (ROGGERS e LEMBKE, 1998).

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

A extração de matérias primas da natureza para a produção de produtos elétricos e eletrônicos (caso do transformador elétrico de potência) demanda índices elevados de consumo de eletricidade e de água nas atividades de beneficiamento e tratamento da matéria prima; em contrapartida, aproximadamente 40% da quantidade de matéria prima extraída é transformada em produto beneficiado, os outros 60% são despejados na forma de bilhões de toneladas de resíduos no planeta Terra, anualmente, sendo classificados como resíduos inerentes ao processo. Além dos resíduos ditos inerentes ao processo, existem os resíduos de pós consumo, que são traduzidos em outros bilhões de toneladas ao serem descartados de maneira inadequada no meio ambiente (PENNA, 2019).

No caso dos minérios (material presente nas peças e componentes do transformador elétrico de potência) o descarte dos resíduos provoca diversos danos ao meio ambiente como por exemplo: perda da vegetação e paisagem nativa, evasão da fauna, poluição do ar, emissão de material particulado (no processo de detonação das rochas), depleção da camada de ozônio, queima de óleos combustíveis, comprometimento da qualidade da água e penetração da luz aos canais aquáticos, assoreamento de rios, despejo de metais pesados ao solo e rios (MENDES e VIEIRA, 2010).

A escassez de trabalhos relacionados aos impactos ambientais do ciclo de vida de equipamentos elétricos em geral, especialmente de transformadores elétricos, motiva as seguintes questões de pesquisa:

A - Como realizar uma análise do ciclo de vida, acrescida do uso da LR, que possibilite a quantificação e a avaliação de potenciais impactos ambientais e energéticos dos transformadores elétricos de potência presentes na rede de distribuição de energia elétrica?

B – Como essa análise pode levar à estratégia de reutilização dos materiais já existentes em situação de pós consumo, que possam ser reinseridos na cadeia manufatureira, reduzindo o uso de insumos para produção de novos produtos e componentes do transformador elétrico de potência, e reduzindo também o consumo energético e os danos dos potenciais impactos ambientais?

Como resposta às questões de pesquisa, formula-se as seguintes hipóteses:

H1 - Um modelo de ACV associado ao uso da LR possibilita a quantificação e a avaliação: dos potenciais impactos ambientais; dos balanços de massa e energético da produção de transformadores, bem como a sua estratificação nas diferentes etapas do ciclo de vida dos transformadores (extração de recursos naturais, atividades de beneficiamento das matérias primas, manufatura de peças e componentes);

H2 – Esse modelo possibilita, também, a identificação de estratégias de fim de vida que sejam mais sustentáveis para aplicar ao caso dos transformadores.

H3 – Esse mesmo modelo permite ainda:

H3.1 - Quantificar o consumo de energia elétrica nas etapas envolvidas para a produção do transformador elétrico de potência, permite visualizar eventuais atividades que possam ser otimizadas com a utilização de componentes já existentes em situação de pós consumo;

H3.2 - Quantificar os potenciais impactos ambientais permite enxergar o perfil ambiental do produto, bem como indicar qual processo ou material atribui maior carga negativa para o meio ambiente;

H3.3 As ações de LR acrescidas de cenários de reutilização de materiais, peças e componentes pós consumo visam indicar situações de diminuição dos potenciais impactos ambientais sejam eles em pequena ou larga escala.

Espera-se assim contribuir para o desenvolvimento sustentável dos produtos de maneira geral e para ampliação do banco nacional de dados do ciclo de vida de produtos.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um modelo de aplicação da ACV acrescida do uso da LR visando quantificar e avaliar os impactos ambientais derivados do uso de insumos virgens e reutilizados na manufatura, focando no caso dos transformadores elétricos de potência presentes na rede de distribuição de energia elétrica urbana, que são classificados como transformadores de potência monofásicos (13,8KV de entrada e em sua saída 127/220V) e trifásicos (30 KVA de entrada com saída de 220/380V).

Também, para atingir o objetivo geral, o presente trabalho têm como objetivos específicos:

- ✓ Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), refinada para o estado da arte da ACV e LR em geral e aplicada para o setor elétrico, com o intuito de mapear os trabalhos existentes na literatura relacionados ao estudo em questão e identificar a lacuna para a pesquisa;
- ✓ Pesquisar, desenvolver e elaborar fluxogramas de ACV e LR para transformadores de potência utilizados na distribuição de energia elétrica, identificando possíveis pontos de convergência, para que sirvam de base para a proposição do modelo;
- ✓ Desenvolver uma proposta de modelo de ACV acrescida do uso da LR para os transformadores elétricos de potência;
- ✓ Aplicar a proposta de modelo a fim de avaliar sua pertinência.
- ✓ Interpretar resultados dos impactos ambientais potenciais, em nível de *midpoint* e *endpoint*.

- ✓ Avaliar técnicas e estratégias de fim-de-vida mais sustentáveis para os transformadores elétricos de potência, para diminuição do descarte inadequado;

1.3 OBJETO DE ESTUDO, DELIMITAÇÃO

O objeto de estudo deste trabalho é o transformador elétrico presente na rede de distribuição de energia elétrica urbana, que é classificado como transformador monofásico ou trifásico de potência, na função abaixador de tensão no sistema, tendo em sua entrada 13,8KV e em sua saída 127/220V (para os monofásicos) e 30 KVA de entrada com saída de 220/380V (para os trifásicos).

Ao objeto de estudo, é empregada a ferramenta ACV acrescida do uso da LR para a avaliação dos impactos ambientais potenciais relacionados ao seu ciclo de vida. Para essa análise, foram avaliadas tanto categorias de impacto em nível de *midpoint* (ao longo do mecanismo ambiental), como aquecimento global, toxicidade humana e depleção da camada de ozônio, quanto categorias de impacto em nível *endpoint* (considerando todo o mecanismo ambiental, até seu ponto final), como saúde humana, qualidade do ecossistema e mudanças climáticas.

A delimitação do trabalho, o uso da ferramenta de ACV e a fronteira do trabalho, incluem as etapas de extração dos recursos naturais, o processamento da matéria prima, a manufatura de peças e componentes, o consumo de energia elétrica na manufatura, e a quantidade de resíduos gerados no fim do ciclo de vida para transformadores elétricos de potência dentro do escopo temporal de uso e fabricação dos últimos 35 anos.

1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A escassez dos recursos naturais, assim como o aumento das emissões de carbono na atmosfera, está diretamente ligada à demanda por produtos oriundos de processos industriais e conseqüentemente do consumo de energia elétrica (UNFCCC, 2011).

Assim, pensando na sustentabilidade dos recursos naturais, diversas convenções e acordos climáticos e ambientais foram discutidos de maneira global nas últimas décadas, com destaque para o Protocolo de Kyoto (1997), a Declaração do Milênio (2000), o Acordo de Paris (2015) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (2015), incluindo discutir a necessidade do desenvolvimento e uso de ferramentas de gestão ambiental. Nesse sentido, diversas ferramentas de gestão ambiental foram desenvolvidas para mensurar o uso dos recursos naturais e consumo de energia elétrica (AVALÁ et.al, 2017; PARRY et al., 2007).

Os transformadores elétricos de potência, são projetados para uma vida útil de 70 anos em regime de operação. Contudo o transformador elétrico de potência é projetado para atuar em regime de trabalho por 70 anos, porém o equipamento possui 35 anos de valor de mercado para as concessionárias de energia elétrica. Ao atingir este período de valor de mercado na maioria dos casos, estes equipamentos são descartados sem nenhuma avaliação prévia a respeito das suas condições de trabalho (DI CAPUA e FEMIA, 2018).

Assim, estratégias de prolongamento da vida útil desses transformadores, como o reparo, LR, recondicionamento e até a remanufatura, mostram-se relevantes para diminuição do consumo dos recursos naturais, de energia elétrica, da poluição em terra, da água, assim como emissões atmosféricas (POTTING et al., 2017; ZARBAKHSNIA et al., 2019).

Poucas empresas, porém, realizam o trabalho de reforma e de LR, isso não é diferente no caso dos transformadores. A LR contribui com a diminuição da extração de recursos naturais, contribui com ganhos econômicos e ambientais das empresas e com a geração de empregos para a comunidade local (DORION et al., 2011).

1.5 METODOLOGIA E OUTLINE DA PESQUISA

A presente pesquisa segue a classificação dada a partir da estrutura da Figura 1



FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA PESQUISA GERAL.

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como aplicada por ter seu foco orientado para a solução de um problema específico (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Quanto à abordagem, caracteriza-se como quantitativa por adotar em sua procedência a quantificação do problema de pesquisa estudado mesurando sua magnitude e variações por meio de valores quantificáveis (KUMAR, 2011).

Com relação aos objetivos, o trabalho pode ser considerado como correlacional por estabelecer uma relação entre ACV e LR, bem como pode ser considerado como exploratório pelo mesmo motivo, além de trazer uma nova visão sobre os conhecimentos de ACV e de uso da LR.

Os métodos de pesquisa adotados caracterizam o trabalho como uma combinação de procedimentos de:

- Estudo de Caso, por se tratar de uma análise específica com interação entre pesquisador e o objeto de pesquisa utilizando múltiplos instrumentos de coleta de dados de maneira aprofundada;
- Método Teórico-Conceitual, por ter como base os conceitos já definidos em Normas como: ABNT/ISO para ACV (14040 e 14044) e os construtos da LR; e por último,
- Modelagem Computacional, por fazer uso de técnicas e *software* computacional para compilar e simular os potenciais impactos ambientais para cada um dos cenários de LR e o perfil ambiental do produto em análise.

Finalmente, a coleta de dados utilizará métodos de Pesquisa Bibliográfica para o desenvolvimento da fundamentação, da identificação do problema de pesquisa e do modelo proposto. Utilizará ainda formulários para serem aplicados aos Estudos de Casos que fundamentarão a proposição do modelo; também serão aplicados para coletar informações que permitirão avaliar a pertinência do modelo.

Dessa forma, a metodologia pode ser representada, no tocante à sua classificação, pela Figura 2.

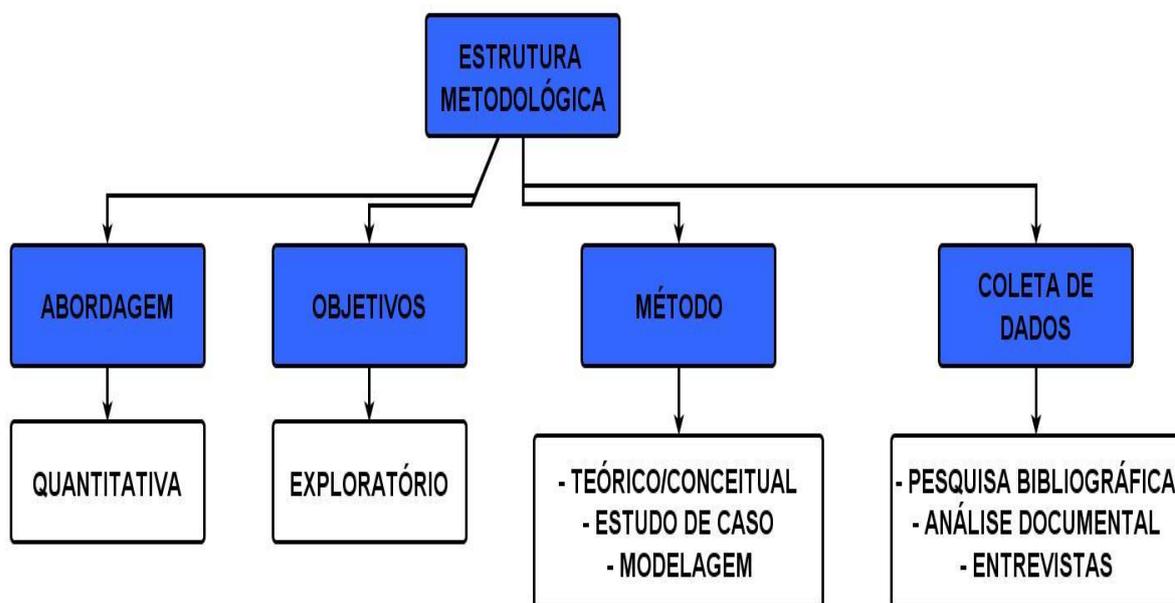


FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA METODOLÓGICA.

Desta forma após apresentação da definição da estrutura metodológica a ser adotada neste trabalho na Figura 3, se encontra o *out-line* da pesquisa, que sintetiza as principais informações sobre a construção deste trabalho, tais como a construção da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e como esta foi executada para identificar e coletar informações pertinentes a respeito do estado da arte de ACV (identificando métodos e modelos de ACV existentes), LR (coletando informações sobre suas principais técnicas e aplicações) e do transformador elétrico de potência (coletando informações sobre técnicas de produção, seus principais componentes e materiais).

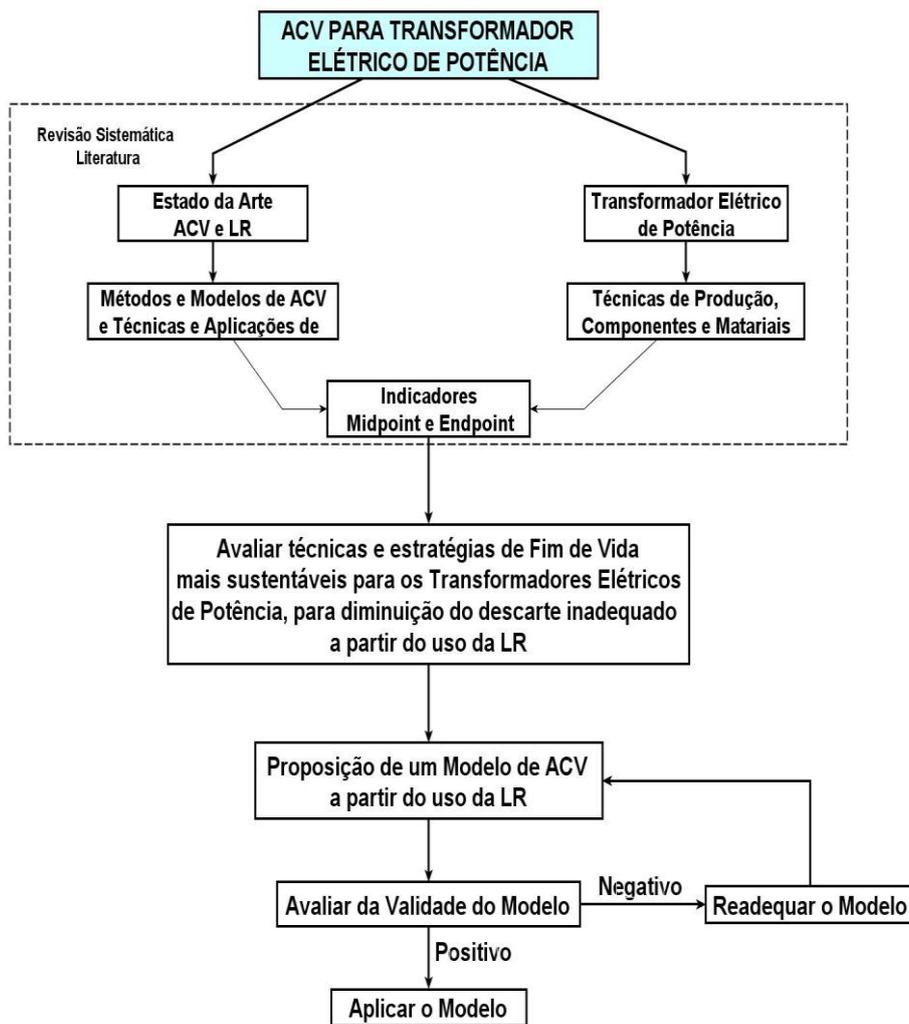


FIGURA 3 – OUT-LINE DA PESQUISA.

O *out-line* da pesquisa apresentado na Figura 3 sintetiza também o processo de construção, validação e aplicação do modelo proposto de ACV para transformadores elétricos de potência passando pela revisão sistemática de literatura, cobrindo o estado da arte da ACV e transformadores elétricos de potência. Em seguida passa pelos objetivos específicos do trabalho, avaliando técnicas e estratégias de fim de vida mais sustentáveis para os transformadores elétricos de potência visando a diminuição do descarte inadequado.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é composta por cinco capítulos e está ilustrada na Figura 4:

Capítulo 1 – Introdução: contém contextualização do tema, justificativa, problema de pesquisa e objetivo.

Capítulo 2 – Revisão da literatura: composta pela fundamentação teórica dos temas contemplados nesta pesquisa e pelo panorama sistemático da literatura (ou revisão sistemática de literatura).

Capítulo 3 – Método da pesquisa: apresenta a classificação da presente pesquisa em relação a sua natureza, sua abordagem, seus objetivos e os procedimentos a serem utilizados.

Capítulo 4 – Proposta de Modelo: é apresentado o modelo proposto e suas definições para aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida a partir do uso da Logística Reversa visando reduzir os impactos no uso de Insumos de manufatura.

Capítulo 5 – Aplicação do modelo proposto: são apresentados os resultados obtidos após aplicação do método de pesquisa e modelo proposto e suas discussões com relação ao objeto de pesquisa.

Capítulo 6 – Conclusões: apresentação preliminar das considerações finais do texto.

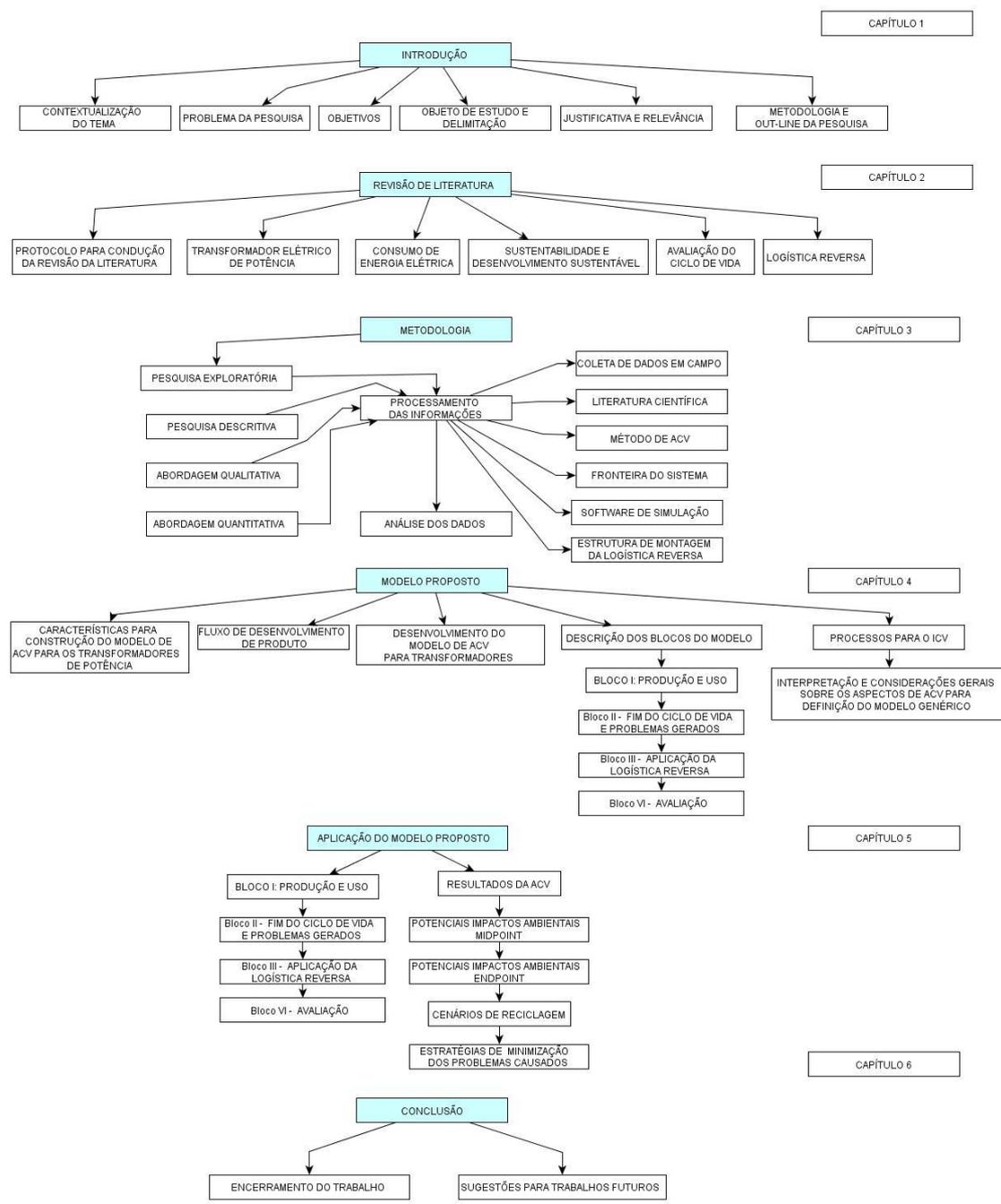


FIGURA 4 - ESTRUTURA DO TRABALHO.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta a revisão da literatura a partir dos trabalhos referentes aos temas de interesse do presente estudo que foram publicados em periódicos, livros, teses/dissertações ou congressos, de modo a contribuir com a fundamentação teórica e metodológica, e com a validação e desenvolvimento das hipóteses da pesquisa.

Os processos de elaboração e desenvolvimento da revisão de literatura foram executados por meio de duas abordagens complementares: a varredura horizontal e a varredura vertical (CAUCHICK *et al.*, 2010).

O uso de técnicas bibliométricas foi empregado como forma de mapear os dados pesquisados dentro escopo proposto para a varredura horizontal, sendo eles: principais palavras chaves encontradas, principais autores em relação ao tema pesquisado.

Houve utilização do *software Start*, versão 4.3 BETA – *open source*, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas em Engenharia de *Software* (LAPES), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), que auxiliou, por meio de sua ferramenta de construção de gráficos, a compor a apresentação dos resultados. O *software* atua como uma ferramenta de organização dos documentos encontrados nas bases de dados (no caso desta pesquisa as bases de dados utilizadas são: *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*), nele também são inseridos os critérios de inclusão e exclusão dos dados a serem absorvidos para construção da RSL (LAPES, 2019).

A interpretação dos dados e gráficos construídos a partir dos dados obtidos da varredura horizontal, serviu como subsídio para o aprofundamento da revisão da literatura, também conhecida como varredura vertical.

2.1 PROTOCOLO PARA CONDUÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, é apresentado o procedimento aplicado para seleção dos tópicos e itens pesquisados pertinentes ao trabalho.

2.1.1 VARREDURA HORIZONTAL

A seleção das palavras-chave utilizou a metodologia apresentada por Pereira (2017), na qual a busca pelos tópicos de interesse da pesquisa deve ser orientada pela própria questão de pesquisa.

Dessa forma, a questão da pesquisa deve ser dividida entre os seus principais tópicos, inserida no portal de busca de periódicos, selecionado o período de publicação desejado e reservados os 5 primeiros trabalhos mais relevantes de cada tópico. Este processo também é conhecido como “varredura na literatura cinzenta”.

Assim, a questão de pesquisa “Como desenvolver um modelo para Avaliação do Ciclo de Vida dos Transformadores de Potência?”, foi dividida nos seguintes tópicos: “proposição de um modelo – *proposing a model*”, “avaliação do ciclo de vida – *life cycle assessment*” e “transformador de potência – *power transformer*”. Cada tópico foi então inserido individualmente no Portal de Periódicos da CAPES como itens de busca.

Após a seleção dos itens de busca a pesquisa foi organizada por ordem de relevância e limitada por período de tempo (últimos 10 anos) e idioma (Português e Inglês). As *strings* de busca, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Strings de busca para seleção das palavras-chave.

Conjunto	Strings de busca
I	"proposição de um modelo" OR " <i>proposing a model</i> "
II	"avaliação do ciclo de vida" OR " <i>life cycle assessment</i> "
III	"transformador de potência" OR " <i>power transformer</i> "

Após a execução das *strings* de busca dentro do Portal de Periódicos da Capes, foram selecionados os 5 primeiros artigos encontrados por ordem de relevância de cada conjunto de *strings*, totalizando 15.

O processamento das informações encontradas na varredura da literatura cinzenta tem como objetivo identificar, a partir do número de repetições das palavras-chave presentes nestes 15 artigos, quais foram os termos que mais se repetiram e assim utilizar estes termos para construção da varredura horizontal.

O Quadro 2 apresenta as palavras relacionadas com maior índice de repetição dentro do tema da questão da pesquisa.

Quadro 2 – Índice de repetições das palavras-chave encontradas.

Palavra	Número de Repetições
<i>Life Cycle Assessment.</i>	5
<i>Power Transformer Model.</i>	2
<i>Power Transformer.</i>	2

A partir do Quadro 2, é possível verificar que o termo “*life cycle assessment*” apresentou o maior número de ocorrências, com 5 repetições. Os termos “*power transformer model*” e “*power transformer*” por sua vez, tiveram apenas 2 repetições cada. As demais palavras-chave dos artigos não foram registradas no Quadro 2, pois não demonstraram aderência ao tema.

2.1.2 VARREDURA VERTICAL

Nesta seção são apresentados os dados obtidos durante o processo de captação de artigos para composição da varredura vertical, a fim de identificar as principais características do tema desta pesquisa. Essa varredura foi efetuada em 3 bases de dados: *Science Direct*, *Scopus*, e *Web of Science*, escolhidas por concentrarem trabalhos acadêmicos nas áreas das engenharias em escala internacional.

As *strings* de busca da varredura desta seção foram elaboradas mediante uma combinação das palavras-chave com maior índice de repetição na varredura horizontal, todas associadas a questão da pesquisa, como exemplificado no Quadro 3.

Quadro 3 – Strings de busca associadas.

(("Life Cycle Assessment") AND ("Manufacturing") AND ("Optimization") AND ("Energy Consumption")) OR ("LCA") AND ("Energy")

Para a primeira etapa de seleção dos artigos nas bases de dados, foi utilizada a seguinte string de busca: *(("Life Cycle Assessment") AND ("Manufacturing") AND ("Optimization") AND ("Energy Consumption")) OR ("LCA") AND ("Energy")*. A busca então foi filtrada para selecionar os artigos dos últimos 10 anos (2010-2019), resultando em 536 artigos nesta primeira etapa de seleção.

Os artigos foram, então, analisados de acordo com a aderência ao tema pesquisado e os critérios apresentados no Quadro 4. A partir dessa análise, 148 artigos foram selecionados e 372 artigos foram rejeitados. Além disso, outros 13 artigos foram identificados em duplicação.

Quadro 4 – Critérios de seleção.

Aspectos	Tratativas
Tipos de trabalhos	- Artigos científicos de pesquisa; - Artigos científicos de revisão.
Critérios de inclusão e exclusão (I) Inclusão (E) Exclusão	(I) Ter as <i>strings</i> de busca no título, resumo e palavras-chave; (I) Ter sido publicado entre os últimos 10 anos; (I) O documento completo estar disponível para leitura ou <i>download</i> ; (I) Idiomas: Inglês ou Português; (E) Não ter sido publicado nos últimos 10 anos; (E) Trabalhos não relacionados ao tema; (E) Artigos duplicados; (E) Não conter as Strings de busca dentre: título, resumo e dentre as próprias palavras-chave.

Desta maneira, os 148 documentos aceitos na etapa anterior serviram de base para a terceira etapa, na qual realizou-se uma análise mais aprofundada dos documentos em relação aos objetivos do estudo. Ao fim, 85 artigos foram selecionados nessa etapa (e outros 62 foram rejeitados).

O gráfico presente na Figura 5 contém a distribuição da quantidade de artigos publicados referente ao tema pesquisado ao longo dos anos.

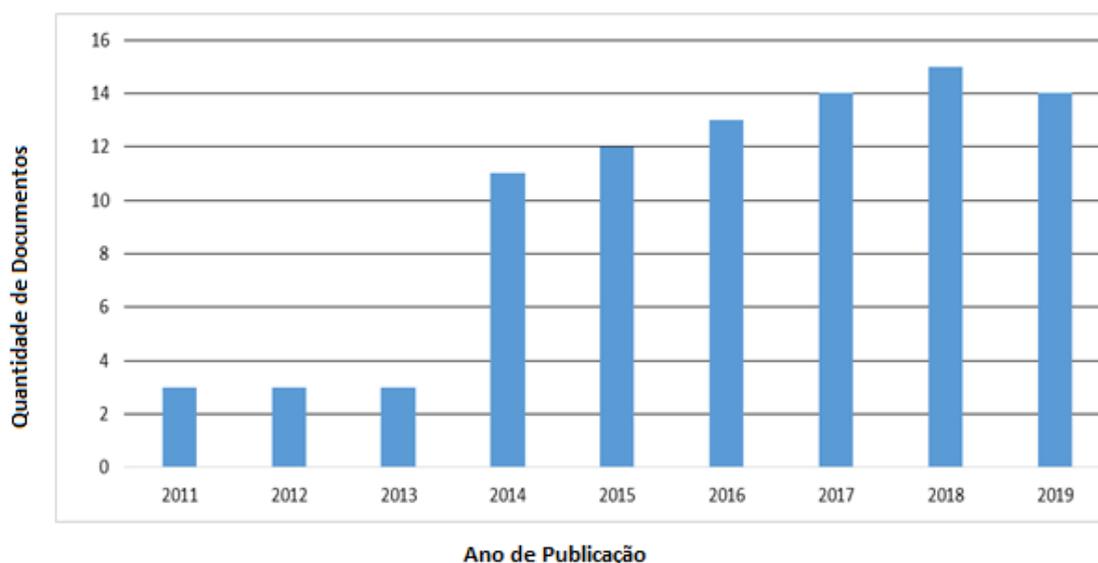


FIGURA 5 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS AO LONGO DOS ANOS.

Interpretando os dados presentes no gráfico da FIGURA 3, é possível constatar que o tema pesquisado possui um comportamento crescente com o passar dos anos, apresentando um grande salto em 2014 (com 11 documentos), atingindo seu pico em 2018 (com 15 publicações) e em 2019 com 14 publicações (até o primeiro semestre).

A distribuição final da quantidade de artigos aceitos por base de dados é apresentada no gráfico de da Figura 6.

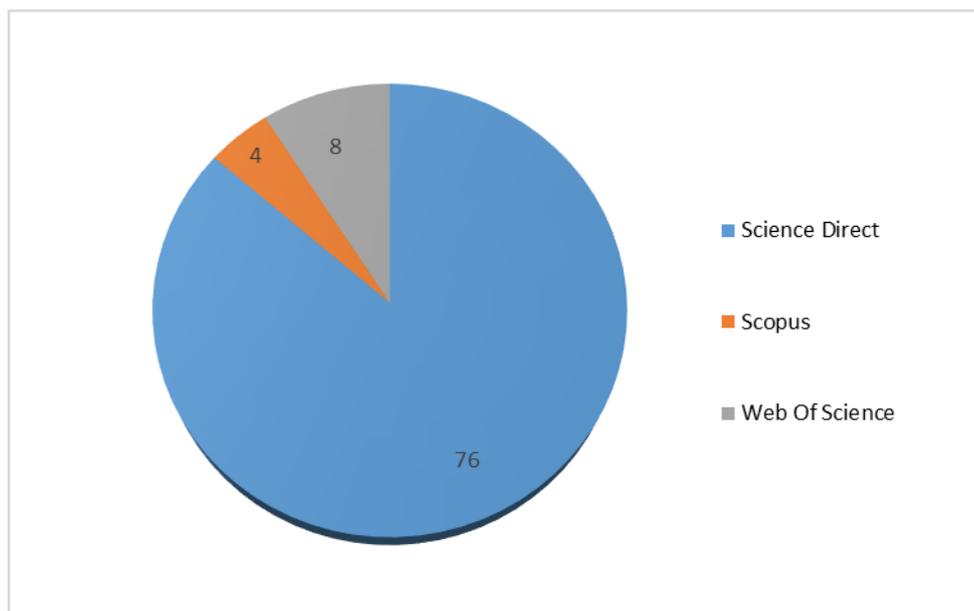


FIGURA 6 – GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE ARTIGOS ACEITOS POR BASE DE DADOS.

A base de dados *Science direct* foi a de maior expressividade dentre os artigos encontrados, com 76 documentos, seguida de *Web of Science* com 8 documentos e *Scopus* com 4 documentos.

Além disso, a pesquisa encontrou 7 periódicos/revistas que apresentaram artigos de uma publicação com relação ao tema, ilustradas, em ordem crescente de publicação, no gráfico da Figura 7.

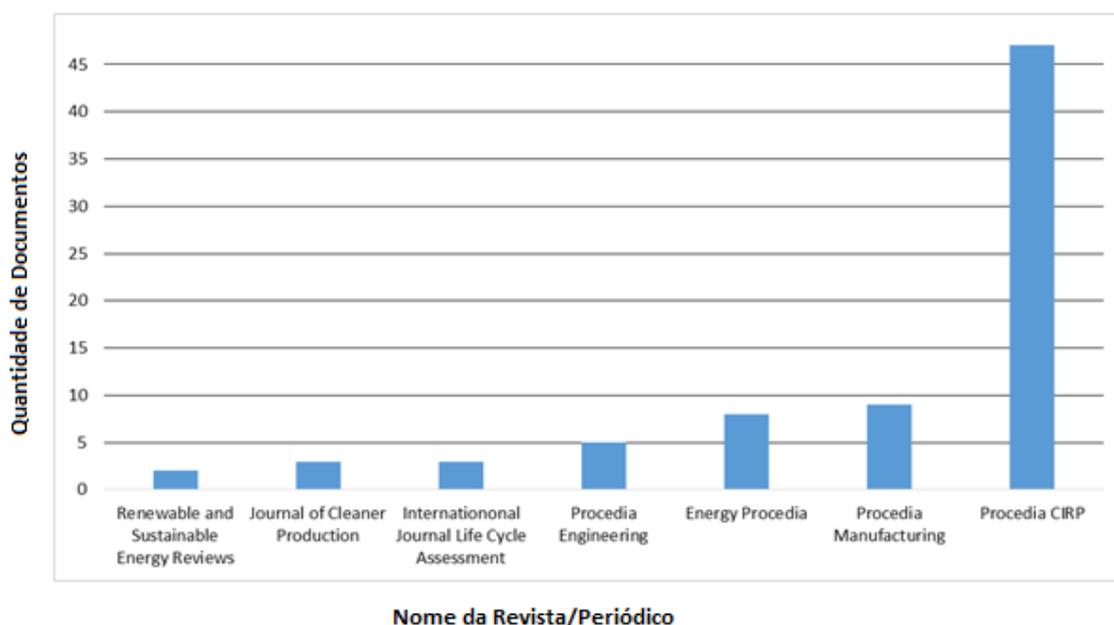


FIGURA 7 – PERIÓDICOS E REVISTAS COM PUBLICAÇÕES SUPERIORES A UM.

A distribuição entre os periódicos e revista foi a seguinte: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2 documentos; *Journal of Cleaner Production*, 3 documentos; *International Journal Life Cycle Assessment*, 3 documentos; *Procedia Engineering*, 5 documentos; *Energy Procedia*, 8 documentos, *Procedia Manufacturing*, 9 documentos; e *Procedia CIRP*, com 47 documentos.

Os demais apresentaram apenas uma publicação dentre os artigos selecionados na última etapa: *Additive Manufacturing*, *Applied Mathematical Modelling*, *Computers & Chemical Engineering*, *Energy*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *Industrial Management & Data Systems*, *Journal of Industrial Ecology*, *Journal of Manufacturing Systems*, *Progress in Natural Science: Materials International* e *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

Os autores com quantidade de publicação superior a um, são apresentados no gráfico da Figura 8, em um total de 16 autores com esta condição quantitativa.

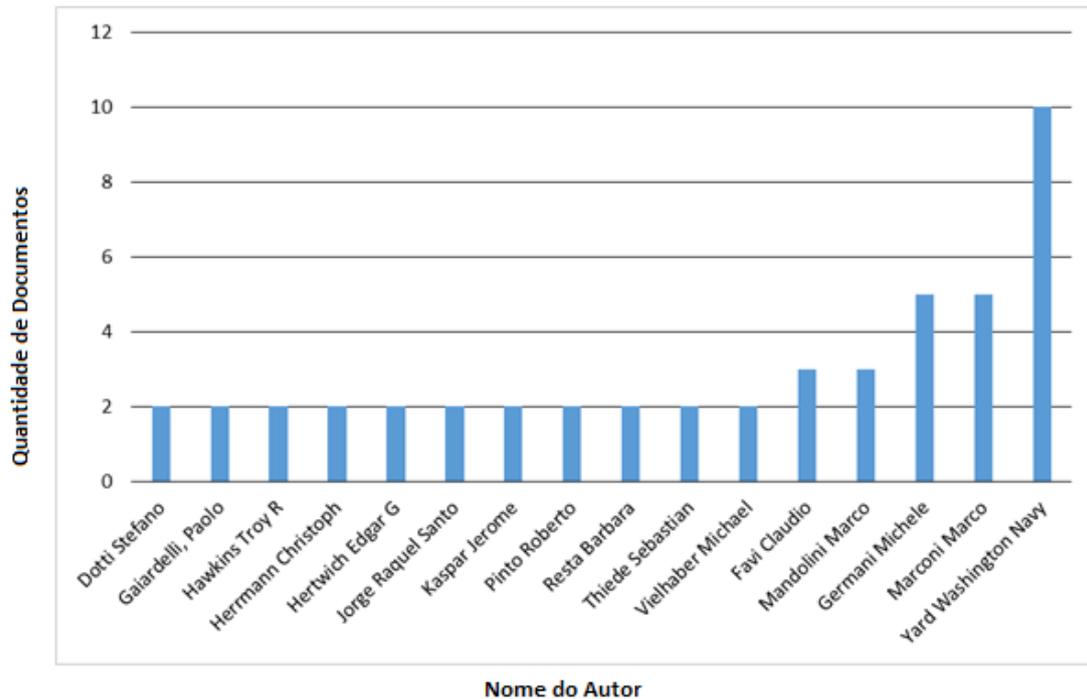


FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DE PUBLICAÇÕES POR AUTOR.

Os autores que mais se destacaram foram: Michele Germani, Marco Mandolini (ambos com 3 publicações) e Yard Navy (com 10 publicações). As palavras-chave foram processadas e as que mais se repetiram dentre os documentos analisadas são expressas no gráfico de nuvem de palavra-chave presente na Figura 9.



FIGURA 9 – GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE.

Interpretando a nuvem, é possível identificar que “*Life Cycle Assessment*”, “*LCA*”, “*Sustainability*” e “*Environmental Impact*” foram os termos que mais se repetiram entre as palavras-chave de todos os artigos analisados. Ainda como síntese dos dados bibliométricos os dados apresentam uma evolução com relação a quantidade de artigos publicados desde o ano de 2001, *Science Direct* se apresentou como a principal base de dados a conter os documentos publicados, o *Procedia CIRP* se apresentou como o periódico a conter maior quantidade de arquivos publicados com relação ao tema (total 45 arquivos) e YARD NAVY como principal autor a publicar neste tema (10 documentos).

2.2 SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O conceito de sustentabilidade vem sendo abordado desde os anos de 1970, e basicamente traduz-se em consumir os recursos naturais de para atender a demanda e necessidades da população na atualidade, de maneira equilibrada sem comprometer o fornecimento destes mesmos recursos para as gerações futuras (ELKINGTON,2013).

O crescimento econômico desenfreado com os adventos da revolução industrial colocou a sociedade a enfrentar problemas com a poluição do ar, solos, mares e rios jamais vistos como: chuva-ácida, extinção da fauna e flora comprometendo a biodiversidade do planeta (PEARSON e FOXON,2012).

A indústria e atividades de manufatura ao mesmo tempo em que poluem o meio ambiente, também são extremamente dependentes dos recursos naturais. A agricultura, por exemplo, é uma das atividades que mais exigem da qualidade do solo e consomem água e o aumento da necessidade de produção de grãos (milho, trigo, arroz, soja e feijão) demandam um uso maior de áreas para seu cultivo, assim mais áreas de vegetação nativa são desmatadas para atenderem os fins da agricultura (TAN-SOO, *et al.*, 2019).

No campo da mineração, a extração dos mais diversos tipos de minérios ainda se encontra em atividade; trata-se de recursos com reservas finitas, e algumas pesquisas já sinalizaram a extinção desses recursos em curto período de tempo: o petróleo tem previsão de 50 anos para sua extinção total, e o gás natural, de 60 anos (JIA *et al.*, 2018). Desta maneira, nas últimas décadas vem sendo tratado o desafio de equalizar o consumo dos recursos naturais, de diminuir a poluição, assim como a emissão dos gases poluentes para atmosfera (TAN-SOO, *et al.*, 2019).

Pensando sobre o uso moderado dos recursos naturais surge o conceito de desenvolvimento sustentável, que parte de um conjunto de ações determinadas desde o ano de 1992, com a reunião da Eco 92, que estabeleceu metas de desenvolvimento, econômico, social e tecnológico, com ações voltadas para redução dos índices de poluição em escala global (ONU, 2015).

Em 2013, a Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, passou a trabalhar no conjunto de metas determinadas a partir de 2015, tendo como foco para 2030 cumprir a agenda de metas, que são constituídas de 17 objetivos e 169 metas, que englobam diversas temáticas, todas voltadas a ações sustentáveis para os ecossistemas, bem-estar social, saúde e educação (ONU, 2015).

Com relação ao objeto de estudo desta pesquisa, essa proposta atua no sentido de 3, dos 17 objetivos. Ligados ao desenvolvimento sustentável e com a fabricação, uso e reuso dos transformadores elétricos, quando submetido a ferramenta de ACV (FINKBEINER et al., 2006).

- ❖ Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (objetivo 9);
- ❖ Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (objetivo 12);
- ❖ Tomar medidas para combater a mudança do clima e seus impactos (objetivo 13);

Ligados ao desenvolvimento sustentável e com a fabricação, uso e reuso dos transformadores elétricos, quando submetido à ferramenta de ACV (FINKBEINER et al., 2006).

Citando por exemplo a biodiversidade brasileira, ela é considerada uma das mais importantes do mundo pela expressividade de seus números em abrangência global: mais de três mil espécies de peixes de água doce, 10% dos mamíferos e anfíbios, 22% da fauna e 20% da diversificação do solo.

2.2.1 APLICAÇÕES DO CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE

A aplicação do conceito de sustentabilidade tem como filosofia orientar o consumo e a gestão dos recursos naturais sem ocasionar a erosão deles para as futuras gerações. Isto que significa que o consumo dos insumos deve ser feito de maneira racional mantendo seus limiares de reposição por sua ordem natural (MOSHREFI *et al.*, 2019).

Na Tabela 1, são apresentados alguns trabalhos que tratam da aplicação dos conceitos de sustentabilidade.

Tabela 1 – Sustentabilidade

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>A Framework for Estimating Regional Footprint of Companies towards Absolute Sustainability</i>	Moshrefi, Sepideh ; Kara, Sami ; Hauschild, Michael	2019	Aborda o desenvolvimento de uma estrutura geral para estimar o direcionamento da sustentabilidade absoluta com estudo de caso em uma indústria.
<i>Understanding the Linkages: A Dynamic Sustainability Assessment Method and Decision Making in Manufacturing Systems</i>	Zhang, Hao	2019	Apresenta um método de avaliação da sustentabilidade como caminho para a tomada de decisão em sistemas de empresas de manufatura.
<i>Environment and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy</i>	Choudhary, Kailash ; Sangwan, K S ; Goyal, Divyanshu	2019	Apresenta um estudo sobre os impactos ambientais em nível <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> e econômicos da reciclagem de PET com fontes renováveis se mostrando um cenário positivo.
<i>An Investigation Into Environmental Impact of System of Systems</i>	Abdoli, Shiva ; Kara, Sami ; Hauschild, Michael	2019	Aborda a respeito da investigação de impacto ambiental (orientado a ACV) de uma estrutura de sustentabilidade voltada a um sistema de produto de múltipla perspectiva, apresentando seus benefícios.
<i>Using a Data-Driven Approach to Unveil Greenhouse Gas Emission Intensities of Different Pulp and Paper Products</i>	Nabinger, Alec ; Tomberlin, Kristen ; Venditti, Richard ; Yao, Yuan	2019	Sob os aspectos da ACV, apresenta a intensidade da emissão dos GEE para distintos produtos de celulose e papel.
<i>The Sustainable Co-Design of Products and Production Systems</i>	Lumsakul, P. ; Sheldrick, L. ; Rahimifard, S.	2018	Examina a interrelação e a interação da eficiência do <i>co-design</i> de produtos e sistemas de produtos sobre o ponto de vista da sustentabilidade.
<i>CO2-based assessment for sustainable production planning in the metal processing industry</i>	Müller, Richard ; Loster, Marc ; Volk, Rebekka ; Schultmann, Frank	2018	Apresenta a avaliação sobre emissão de CO ₂ como ponto de planejamento de produção em uma indústria de processamento de metal.
<i>Sustainable Living Factories for Next Generation Manufacturing</i>	Koren, Yoram ; Gu, Xi ; Badurdeen, Fazleena ; Jawahir, I.S.	2018	Aponta a prática de utilização dos 6Rs como uma das alternativas o caminho da manufatura sustentável.
<i>Integrated Product and Production Engineering Approach - A Tool-Based Method for a Holistic Sustainable Design, Process and Material Selection</i>	Stoffels, Pascal ; Kaspar, Jerome ; BÄhre, Dirk ; Vielhaber, Michael	2018	Apresenta uma abordagem integrada de engenharia de produção e produto com o uso de ferramentas destinadas a um projeto holístico sustentável para seleção material e processo.
<i>Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact</i>	Peng, Tao and Kellens, Karel and Tang, Renzhong and Chen, Chao and Chen, Gang	2018	Associa os aspectos da sustentabilidade de manufatura aditiva com a demanda do consumo da energia elétrica em

			suas atividades e o impacto ambiental relacionado.
<i>Climate Change and Manufacturing</i>	Mitchell, Geoffrey R.	2017	Aborda e relaciona as mudanças climáticas com a indústria de manufatura dada a sua contribuição pelo de recursos naturais e emissão de poluentes.
<i>Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review</i>	Singh, Sunpreet and Ramakrishna, Seeram and Gupta, Munish Kumar	2017	Apresenta em conjunto com uma RSL conjunto de ações destinadas a sustentabilidade visando a geração zero de resíduos voltando-se para o cenários dos REEE (Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos) e resíduos de produtos de uma indústria aeroespacial.
<i>A Software Tool for the Analysis and Management of Resource Consumptions and Environmental Impacts of Manufacturing Plants</i>	Favi, Claudio ; Germani, Michele ; Mandolini, Marco ; Marconi, Marco	2017	Aborda a aplicação de uma ferramenta computacional para avaliação do consumo de eletricidade e insumos de manufatura sob a perspectiva da ACV, quantificando a emissão de poluentes.
<i>Exploration of Simulation-Driven Support Tools for Sustainable Product Development</i>	Jaghbeer, Yasmeen ; Hallstedt, Sophie I. ; Larsson, Tobias ; Wall, Johan	2017	Apresenta o uso de ferramentas de simulação computacional para o planejamento e desenvolvimento de produtos de cunho sustentável.
<i>Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability</i>	Gebisa, A.W. ; Lemu, H.G.	2017	Contempla os aspectos de otimização de projeto da indústria de manufatura aditiva analisando as implicações da sustentabilidade do produto.
<i>Including Towards Sustainable Mining in Evaluating Mining Impacts</i>	Jeswiet, J.	2017	Apresenta uma avaliação dos impactos ambientais relacionados a indústria de mineração.
<i>Information Management Platform for the Application of Sustainable Product Development Methods</i>	Pfärrtner, Anne ; Buchert, Tom ; Lindow, Kai ; Stark, Rainer ; Hayka, Haygazun	2016	Apresenta uma solução tecnologia para contribuir com a gestão de processos e documentos voltados para aplicação de métodos que contribuem para o desenvolvimento sustentável de produtos.
<i>Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs)</i>	Azapagic, Adisa ; Stamford, Laurence ; Youds, Lorraine ; Barteczko-Hibbert, Christian	2016	Apresenta um estudo de caso sobre os pilares do TBL com foco no consumo e produção de produto sustentável e o uso da energia elétrica como um dos insumos bem como os problemas gerados.
<i>Development of Sustainable Manufacturing Performance Evaluation</i>	Singh, Sujit ; Olugu, Ezutah Udony ; Musa, Siti Nurmaya	2016	Desenvolvimento de um sistema tecnológico com uso de lógica fuzzy para medir o desempenho de práticas sustentáveis

<i>Expert System for Small and Medium Enterprises</i>			utilizados nos processos de manufatura de pequenas e médias empresas.
<i>A detailed calculation model for costing of green manufacturing</i>	Orji, Ifeyinwa and Wei, Sun	2016	Apresenta um modelo de cálculo detalhado para os custos da manufatura verde direcionado ao aumento da competitividade das empresas.
<i>Sustainable Manufacturing based Decision Support Model for Product Design and Development Process</i>	Kulatunga, A.K. ; Karunatilake, N. ; Weerasinghe, N. ; Ihalawatta, R.K.	2015	Apresenta um modelo de suporte a tomada de decisão voltado para a manufatura sustentável destinado ao processo de desenvolvimento de produto, com base no ciclo de vida do mesmo.
<i>On the Applicability of Sustainability Assessment Tools in Manufacturing</i>	Moldavska, Anastasiia ; Welo, Torgeir	2015	Revisa o estado da arte sobre ferramentas direcionadas para aplicação dos conceitos de sustentabilidade para indústrias de manufatura.
<i>The Impact of Automotive Product Remanufacturing on Environmental Performance</i>	Yang, S.S. ; Ngiam, H.Y. ; Ong, S.K. ; Nee, A.Y.C.	2015	Apresenta os benefícios da remanufatura de produtos automotivos como por exemplo a redução do consumo de energia elétrica e o seu desempenho ambiental associado.
<i>Better But is it Good Enough? On the Need to Consider Both Eco-efficiency and Eco-effectiveness to Gauge Industrial Sustainability</i>	Hauschild, Michael Z.	2015	Benefícios sobre a necessidade de considerar a ecoeficiência e a eco eficácia para mensurar a sustentabilidade industrial.
<i>Hierarchical Evaluation of Environmental Impacts from Manufacturing System and Machine Perspective</i>	Heinemann, Tim ; Schraml, Philipp ; Thiede, Sebastian ; Eisele, Christian ; Herrmann, Christoph ; Abele, Eberhard	2014	Apresenta uma avaliação hierárquica dos potenciais impactos ambientais com relação aos sistemas de fabricação, considerando a eficiência energética das máquinas de manufatura e a emissão de poluentes relacionada.
<i>The Method for Assessment of the Sustainability Maturity in Remanufacturing Companies</i>	Golinska, Paulina ; Kuebler, Frank	2014	Apresenta um método de avaliação da maturidade da sustentabilidade em empresas de remanufatura, sob a óptica do consumo de energia elétrica e demais insumos, desenvolvido por meio de uma revisão de literatura.
<i>A Semantic Framework for Sustainable Factories</i>	Terkaj, Walter ; Danza, Ludovico ; Devitofrancesco, Anna ; Gagliardo, Stefano ; Ghellere, Matteo ; Giannini, Franca ; Monti, Marina ; Pedrielli, Giulia ; Sacco,	2014	Aborda o desenvolvimento e uso de uma estrutura ligada aos fatores de sustentabilidade, visando a integração de modelos digitais e ferramentas de apoio para a gestão de uma planta indústria (caso europeu).

	Marco ; Salamone, Francesco		
<i>A Method for the Estimation of the Economic and Ecological Sustainability of Production Lines</i>	Germani, Michele ; Mandolini, Marco ; Marconi, Marco ; Marilungo, Eugenia	2014	Trata sobre o desenvolvimento para a estimativa da sustentabilidade econômica e ecológica das linhas de produção.
<i>A State-of-the-art Review and Evaluation of Tools for Factory Sustainability Assessment</i>	Chen, Danfang ; Schudeleit, Timo ; Posselt, Gerrit ; Thiede, Sebastian	2013	Apresenta o estado da arte sobre as existentes ferramentas disponíveis na atualidade para avaliação do nível de sustentabilidade da indústria.
<i>Environmental Impact Reduction in Discrete Manufacturing: Examples for Non-Conventional Processes</i>	Kellens, K. ; Dewulf, W. ; Lauwers, B. ; Kruth, J.-P. ; Dufloy, J.R.	2013	Apresenta redução de potencial impacto ambiental na manufatura discreta em processos não convencionais, apresentando melhorias da implementação de processos tecnológicos atualizados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As aplicações dos conceitos de sustentabilidade na indústria e na manufatura são de suma importância para condução de produtos ao que se refere ao termo “produtos verdes”. Para isso, toda a gestão da cadeia de suprimentos de uma unidade fabril deve ser implementada também levando em consideração os aspectos ambientais (TERKAJ et al., 2014).

Inicialmente, para que a redução da emissão de poluentes possa acontecer, cada indústria deve trabalhar no mapeamento de suas atividades de manufatura e traçar estratégias de diminuição do consumo de combustíveis e eletricidade adaptando seus processos para um cenário produtivo amparados pela sustentabilidade e unidades fabris ecológicas (GERMANI *et.al*, 2014).

Na Alemanha, por exemplo, 20% das emissões de CO_{2eq} emitidas anualmente são provenientes de indústrias de produtos de transformação (MÜLLER *et.al*, 2018).

No modelo analisado no estudo sobre avaliação de CO₂ para o planejamento de produção sustentável em uma indústria de processamento de metais, levou em consideração os dados de fluxo de entrada e saída de materiais, e o uso de eletricidade.

Identificou-se que 59% do que é emitido de CO₂ corresponde ao processo de manufatura do produto final. E para a planta fabril ter um rendimento positivo

com relação às práticas sustentáveis seria necessário efetuar a troca de maquinário e adaptação de seus fluxos (MÜLLER *et.al*, 2018).

Em linhas gerais, para a próxima era de geração de produtos, as empresas precisam se adaptar para entregar um produto socialmente aceito dentro dos padrões sustentáveis empregando técnicas como 6R (reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar, reprojeter e remanufaturar) e RMS (Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis), fomentando uma economia sustentável e com resposta rápida para atender as necessidades de mercado atual e futuras (KOREN, BADURDEEN e JAWAHIR, 2018).

Trabalhos abordando o campo da sustentabilidade energética são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Sustentabilidade Energética

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems</i>	Mawson, Victoria Jayne ; Hughes, Ben Richard	2019	Revisão e avaliação de ferramentas existentes destinadas a melhorar a eficiência energética em processos e sistemas de manufatura.
<i>A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling</i>	Deng, Rong ; Chang, Nathan L. ; Ouyang, Zi ; Chong, Chee Mun	2019	Apresenta uma RSL de critérios técnico econômica sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício.
<i>Reducing industrial energy demand in the UK: A review of energy efficiency technologies and energy saving potential in selected sectors</i>	Chowdhury, Jahedul Islam ; Hu, Yukun ; Haltas, Ismail ; Balta-Ozkan, Nazmiye ; Matthew, George Jr. ; Varga, Liz	2018	Apresenta uma RSL a respeito da redução do consumo de energia elétrica do setor industrial do reino unido, sob os aspectos das tecnologias de eficiência energética existentes.
<i>An approach to favor industrial symbiosis: the case of waste electrical and electronic equipment</i>	Marconi, Marco ; Gregori, Fabio ; Germani, Michele ; Papetti, Alessandra ; Favi, Claudio	2018	Aborda do caso dos REE e a relação do reaproveitamento dos materiais existentes em diversas aplicações para a indústria de manufatura com os benefícios da economia circular.
<i>Energy and emissions analysis of next</i>	Baldassarri, Catia and Shehabi, Arman and	2016	Apresenta uma análise do consumo de energia

<i>generation electrochromic devices</i>	Asdrubali, Francesco and Masanet, Eric		elétrica dos dispositivos elétricos de última geração quantificação o potencial de emissões atmosféricas.
<i>A 'Design for Energy Minimization' approach to reduce energy consumption during the manufacturing phase</i>	Seow, Yingying and Goffin, Nicholas and Rahimifard, Shahin and Woolley, Elliot	2016	Apresenta um projeto de minimização do consumo de energia elétrica durante a fase de fabricação de produtos.
<i>A Lean Based Overview on Sustainability of Printed Circuit Board Production Assembly</i>	Esfandyari, Alireza ; HÄrter, Stefan ; Javied, Tallal ; Franke, JÄrg	2015	Apresenta uma visão geral baseada no Lean abordando o conceito de sustentabilidade para produção e montagem de placas de circuito impresso.
<i>Establishing EcoReliability of Electronic Devices in Manufacturing Environments</i>	Middendorf, Andreas ; Benecke, Stephan ; Nissen, Nils F. ; Wittler, Olaf ; Lang, Klaus-D.	2015	Apresenta uma visão estabelecer Eco-reabilitação e Eco-confiabilidade para dispositivos eletrônicos para ambientes de fabricação.
<i>CO2 Emission Reduction Potential in China's Electricity Sector: Scenario Analysis Based on LMDI Decomposition</i>	Gu, Baihe ; Tan, Xianchun ; Zeng, Yuan ; Mu, Zekun	2015	Apresenta a potencial redução da emissão de CO2 para o setor elétrico chinês com base em uma análise matemática por <i>Logarithmic Mean Divisia Index</i> .
<i>Energy Use in Premanufacture (Mining)</i>	Jeswiet, J. ; Archibald, J. ; Thorley, U. ; De Souza, E.	2015	Apresenta o uso de eletricidade empregada no setor da mineração.
<i>Usage of a Digital Eco-factory for Green Production Preparation</i>	Matsuda, Michiko ; Kimura, Fumihiko	2013	Propõe a utilização de critérios de Produção Verde para uma indústria de tecnologia da informação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabe-se que a geração e o uso da eletricidade são fatores decisivos para o progresso e desenvolvimento no campo tecnológico. Desta forma este setor também é responsável gerar danos ambientais severos para a natureza (MAWSON *et al.*, 2019).

Trabalhar com a composição de cenários distintos e testar soluções em curto prazo e aplicá-las após validação pode ser uma das alternativas para redução dos impactos ambientais oriundos da geração de energia, como por exemplo no

caso da China que tem uma meta para até 2030, reduzir em torno de 20% das suas emissões no setor (GU et.al, 2015).

Uma alternativa para implantação de novas fábricas com gestão de seus recursos ambientais e energéticos seria a partir do uso do conceito de “eco fábrica digital”, em que toda a estrutura da fábrica, *layout*, recursos, e insumos são simulados e projetados para ter menos resíduos e emissões de poluentes (MATSUNADA e KIMURA, 2013).

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV

No ano de 1974 na Europa surgiram estudos que futuramente compuseram a ferramenta de gestão ambiental denominada ACV (em inglês: *Life Cycle Assessment - LCA*), no sentido de quantificar em forma de balanço de massa e de balanço energético, os insumos da manufatura de processos ou produtos, assim como de quantificar os impactos ambientais divididos em dois níveis: *midpoint* e *endpoint* (HAUPT, KÄGI e HELLWEG, 2018).

A técnica ACV foi desenvolvida com o intuito de avaliar os impactos ambientais, desde a extração dos recursos naturais até a disposição final do produto, podendo ser empregada para o desenvolvimento e melhoria do produto, definição de planejamentos estratégicos, políticas públicas, gestão de impactos ambientais de produtos e serviços (FAVA et al., 2014).

A ACV teve seu início difundido nos anos 1980 na Europa, em especial na Holanda Alemanha e Suécia, que propuseram uma técnica de gestão ambiental com o objetivo de reduzir o uso não sustentável dos recursos naturais e também reduzir os índices de poluição. Posteriormente, a ACV foi difundida pela Áustria, Finlândia, Canadá, França, Portugal, Noruega, Japão e EUA, e nos dias de hoje tem abrangência em mais de 80 países (GUINÉE, 2002).

A empresa Coca-Cola foi uma das primeiras a realizar este tipo de estudo em 1979, realizou uma ACV para suas embalagens de vidro, comparando naquela época a quantidade água utilizada no processo de higienização das garrafas de

vidro e a quantidade utilizada para fabricar a garrafa PET e naquele momento após a ACV da garrafa PET e da garrafa de vidro, decidiu-se seguir fabricando as garrafas PET's ao invés de reutilizar garrafas de vidro.

A estrutura a ACV é composta por 4 fases:

1ª Definição de objetivo e escopo: são definidos os aspectos de contextualização, direcionamento da aplicação, definição do público alvo, definição do produto ou processo a ser analisado.

2ª Análise de inventário: nesta fase de inventário do ciclo de Vida, são coletadas as informações de entrada e saída do produto ou processo e analisado. As informações basicamente são: quantidade de matéria prima utilizada, tipos de insumo, quantidade de cada tipo de insumo utilizado para a manufatura do processo, quantidade de energia utilizada, dados de transporte, e também os dados relacionados a geração dos resíduos.

3ª Avaliação de impacto do ciclo de vida: é realizada a partir dos dados inseridos na fase anterior e através da Análise do Inventário do Ciclo de Vida (AICV), são calculados os impactos ambientais distribuídos em categorias de impacto.

4ª Interpretação: esta fase visa sintetizar os dados provenientes da terceira etapa, com base nos critérios definidos no objetivo e escopo; Os resultados gerados nesta etapa servem para quantificar o perfil ambiental de um produto ou processo; Permitindo então com a interpretação dos dados traçar estratégias de redução e mitigação dos potenciais impactos ambientais. A Figura 10 apresenta a estrutura da ACV, estabelecida pela Norma ISO 14040.

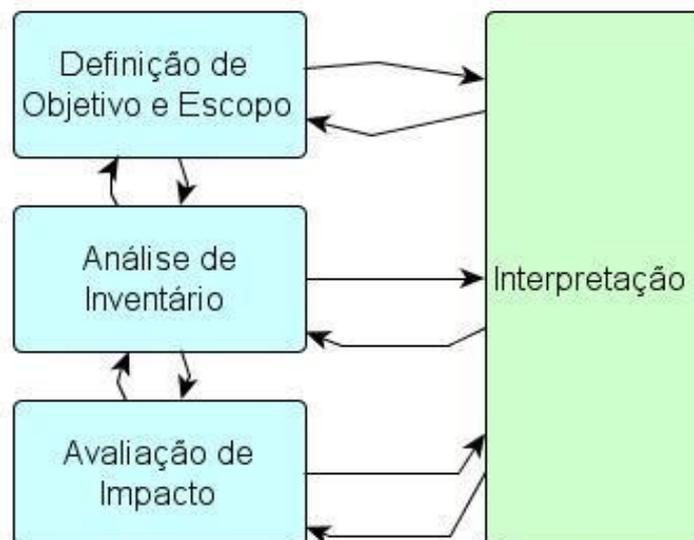


FIGURA 10 – ESTRUTURA DA ACV. FONTE: ADAPTADO ISO14040.

Quando um produto passa por uma ACV caracterizada “do berço ao túmulo”, significa realizar a quantificação dos impactos ambientais, de todas as matérias primas, desde a extração à destinação final após o seu uso.

Esta avaliação permite indicar ações de reuso e reciclagem das matérias primas extraídas da natureza, podendo ser reintegradas aos processos de manufatura, prolongando a vida útil do material, diminuindo a extração dos recursos naturais, do uso de energia, para minimizar o impacto ambiental, de maneira global (ISO 14040, SALIERI, 2018).

A ferramenta ACV é estruturada por um conjunto de normas, permitindo uma análise técnica e científica sobre as questões ambientais de um determinado produto ou processo, sendo elas:

- ✓ **ISO 14040:** Princípios e estrutura (FINKBEINER *et al.*, 2006);
- ✓ **ISO 14044:** Gestão ambiental, Avaliação do ciclo de vida, Requisitos e orientações (DI CAPUA e FEMIA, 2018);
- ✓ **ISO TR 14047:** Exemplos para aplicação da ISO orientações (DI CAPUA e FEMIA, 2018);
- ✓ **ISO TS 14048:** Formato da apresentação de dados orientações (DI CAPUA e FEMIA, 2018);

- ✓ **ISO TR 14049:** Exemplos de aplicação da *ISO 14041* para definição de objetivos e escopo, e análise de inventário orientações (DI CAPUA e FEMIA, 2018);

A ACV também pode ser classificada por segmento de avaliação, setorizadas do tipo do setor da análise, como por exemplo:

- ✓ Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos - ACV (*Product LCA*);
- ✓ Avaliação do Ciclo de Vida Energético - ACVE (*Energy LCA*);
- ✓ Avaliação do Ciclo de Vida de Infraestrutura e Construções - ACVIC (*Infrastructure LCA*);
- ✓ Avaliação do Ciclo de Vida das Cidades - ACVC (*City LCA*).

A utilização da ACV nos processos produtivos é uma das formas de atingir o caminho da sustentabilidade e produção mais limpa para o meio ambiente, que compreende desde as etapas da exploração e beneficiamento da matéria-prima, o processamento industrial voltado ao desenvolvimento e concepção do produto, cumprindo normas ambientais e sintetização de processos, até as etapas de reciclagem, reutilização ou descarte, de uma maneira que provoque menor agressão ao meio ambiente (FAVA et al., 2014).

A Figura 11 ilustra de forma simplificada a visão geral do desenvolvimento do ciclo de vida de um produto (KOBAYASHI, 2018).

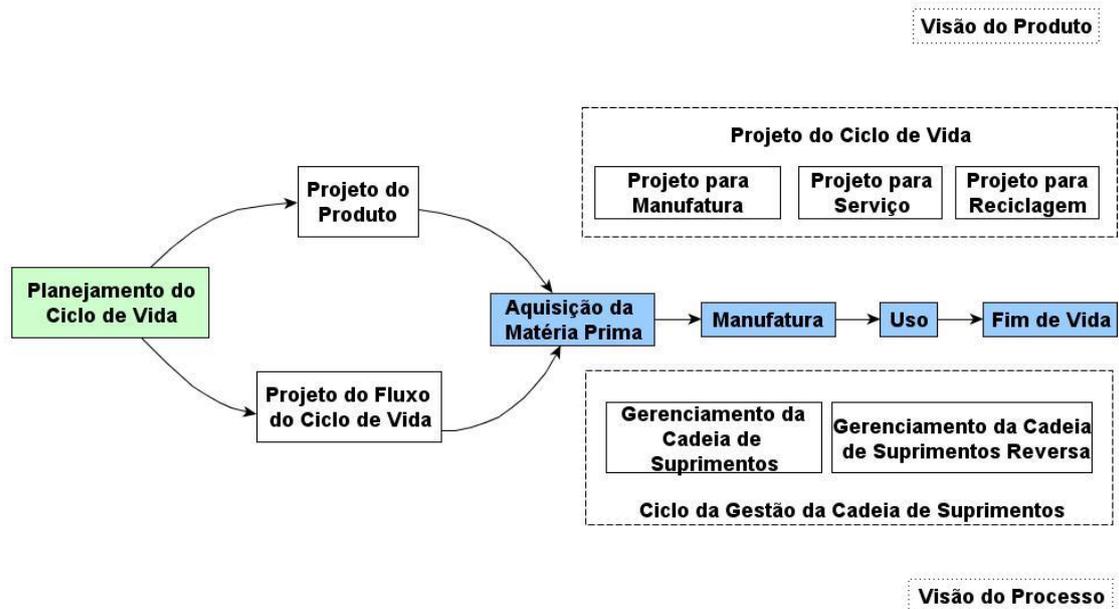


FIGURA 11 - VISÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DO CICLO DE VIDA (ADAPTADO KOBAYASHI, 2018).

Na Figura 11 é possível observar que o desenvolvimento do ciclo de vida de um produto ou processo passa pela fase de projeto do produto/fluxo do ciclo de vida, pela fase de aquisição da matéria prima, pela fase de manufatura, e pelo uso (consumo) do produto, até chegar no fim da vida do produto ou processo. Em todas essas fases é possível inserir conceitos de reaproveitamento e reciclagem de materiais, como é a proposta do presente trabalho.

2.3.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Para construção da avaliação de impacto do ciclo de vida é necessário que se tenha um método aderente com a realidade de processamento dos dados que se deseja analisar.

Cada método de avaliação de impacto do ciclo de vida contempla um grupo de categorias de impacto ambiental, podendo ser em nível de *midpoint* ou *endpoint*. A seguir são descritos alguns dos métodos de avaliação de impacto ambiental usados em trabalhos publicados na literatura.

2.3.1.1 MÉTODO ECO-INDICATOR 99

Oriundo da política integrada de produto do ministério holandês de moradia, planejamento espacial e ambiental. Amplamente utilizado por empresas que buscam avaliar seus produtos e processos com os parâmetros da ACV, classificado como um método de análise em nível de *endpoint* tem a sua primeira estrutura divulgada no ano de 1995 (DREYER *et al.*, 2003).

Contempla uma abordagem aplicada aos danos para a saúde humana e ecossistema através de seus indicadores após avaliação de inventário do ciclo de vida. Tendo abrangência em escala global para avaliação e compilação dos resultados, servindo posteriormente de base para a elaboração dos métodos *Impact 2002* e *LIME*, as categorias de impacto deste método são apresentadas na Figura 12 (DREYER *et al.*, 2003).



FIGURA 12 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO ECO-INCATOR 99 (FONTE: ADAPTADO DE DREYER ET AL., 2003).

2.3.1.2 MÉTODO CML 2002

Desenvolvido e publicado em pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML) na Holanda, em conjunto com o Escritório de

Combustíveis e Matérias-Primas e com a Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada (TNO) no ano de 2002. Construíram um documento guia para metodologia de ACV, contribuindo universalmente para a evolução de trabalhos utilizando a ferramenta ACV (FRISCHKNECHT *et al.*, 2003).

Estruturado com instruções e orientações para a condução das atividades e aplicação dos conceitos pertencentes à ACV, com base na norma ISO 14040. Caracterizado em nível de *midpoint* para análise dos resultados com abrangência em escala global. Na Figura 13, são apresentadas as categorias de impacto ambiental cobertas pelo método em questão (FRISCHKNECHT *et al.*, 2003).



FIGURA 13 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO CML 2002 (FONTE: ADAPTADO FRISCHKNECHT ET AL., 2003).

2.3.1.3 MÉTODO *ReCiPe* ACV

O método *ReCiPe* foi desenvolvido após uma das conferências da SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) realizada no ano 2000 em Brighton na Inglaterra, onde 50 profissionais especialistas em ACV, identificaram a necessidade de ter um método de ACV, estruturado de maneira uniforme para análises e avaliações nos níveis de *midpoint* e *endpoint* (ACERO et al., 2014).

Desta forma o método *ReCiPe*, foi estruturado com base no método CML 2002 para abordagem *midpoint* e o método *Eco-indicador* 99 para a abordagem *endpoint*. No qual todas as categorias de impacto ambiental foram atualizadas, destacando, por exemplo, os fatores de caracterização para aquecimento global, que foram integrados para os gases de efeito estufa com substâncias associadas à acidificação e impactos respiratórios (ACERO et al., 2014).

O método *ReCiPe* integra a abordagem *midpoint* e *endpoint*, com capacidade de abrangência em nível global e europeu distribuído em suas categorias de impacto ambiental, na Figura 14 (ACERO et al., 2014).

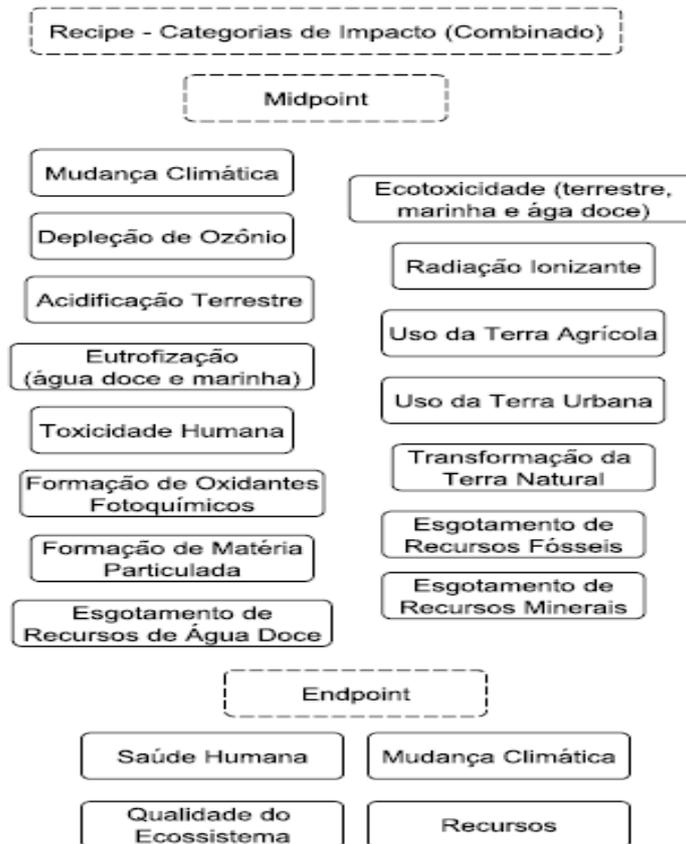


FIGURA 14 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO RECIPE (FONTE: ADAPTADO ACERO ET AL., 2014).

2.3.1.4 MÉTODO *IMPACT 2002+*

Elaborado na Suíça e divulgado no ano de 2002, trata os dados de ICV em nível de *midpoint* (14 categorias) e *endpoint* (4 categorias) na compilação de seus resultados, tendo como abrangência o cenário europeu. As categorias de impacto em nível *midpoint* convergem para uma categoria de impacto em nível de *endpoint* (SOARES *et al.*, 2006).

Sua concepção foi estruturada com base na adaptação de categorias de impacto de outros métodos como o *Eco-Indicator 99* e o *CML 2002*, juntamente com apoio dos projetistas do método *LIME*. As categorias de impacto encontram-se presentes na Figura 15 (SOARES *et al.*, 2006).

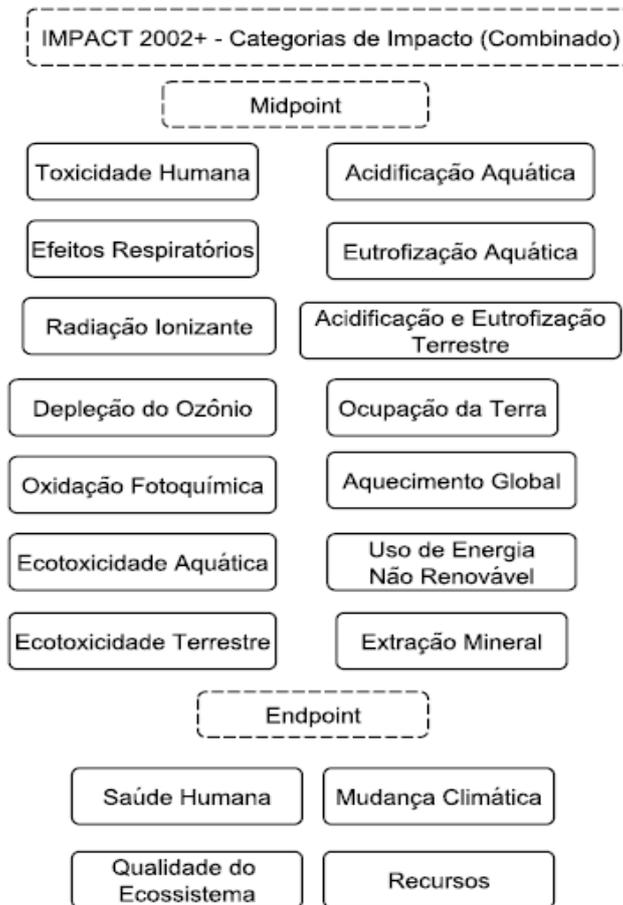


FIGURA 15 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO IMPACT 2002+
(FONTE: ADAPTADO, SOARES ET AL., 2006).

2.3.1.5 MÉTODO *IMPACT WORLD+*

Este método em específico foi criado a partir de uma colaboração de seis instituições de pesquisa, distribuídas entre cinco países e uma empresa (Alcoa) responsável pelo investimento financeiro do desenvolvimento do projeto, conforme descritos a seguir:

- Canadá: grupo de pesquisa CIRAIG da Faculdade Politécnica de Montreal;
- Dinamarca: Universidade Técnica da Dinamarca;
- Estados Unidos da América (E.U.A): Universidade de Michigan;
- França: Cycleco;
- Suíça: Escola Politécnica de Lausanne.

A união dos esforços destas instituições de pesquisa para construção deste método foi exatamente pelo fato de não existir um método de caráter amplo para geração de resultados (ECOINVENT, 2018).

Compilando os fatores metodológicos para elaboração da Análise de Inventário do Ciclo de Vida (AICV), nos métodos LUCAS, EDIP e Impact 2002+, tendo como diferencial escala geográfica sensível para simulação dos resultados. A Figura 16 ilustra as categorias de impacto ambiental da deste método (ECOINVENT, 2018).



FIGURA 16 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO IMPACT WORLD+
(FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).

2.3.1.6 MÉTODO LUCAS

Desenvolvido no Canadá no ano de 2005, pela Escola Politécnica de Montreal no Centro de Pesquisa Interuniversitário para Ciclo de Vida de Produtos, Processos e Serviços (CIRAIG), voltado a atender a demanda canadense para o setor de ciclo de vida, seguindo orientações da SETAC (*Society of*

Environmental Toxicology and Chemistry), em nível de *midpoint* (ECOINVENT, 2018).

Para mapeamento da zona territorial do Canadá, o país foi dividido em quinze zonas considerando as características climáticas, geográficas e ambientais para cada uma das quinze zonas (ECOINVENT, 2018).

A estruturação da concepção deste modelo foi editada com base nos métodos já existentes: *LIME*, *TRACI*, *Impact 2002+* e *EDIP 2003*, surgindo então *LUCAS* (*LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context*). As categorias de impacto ambiental pertencentes ao método *LUCAS*, são apresentadas na Figura 17 (ECOINVENT, 2018).



FIGURA 17 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO LUCAS (FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).

2.3.1.7 MÉTODO *LIME*

No ano de 1998, no Japão o Ministério da Economia, Comércio e Indústria investiu em um projeto nacional de ACV, com a iniciativa de criar um banco de

dados com auxílio da indústria para elaboração de projetos de ACV de maneira confiável (ECOINVENT, 2018).

Em que posteriormente em 2003, resultou na consolidação do método em questão, com base especificamente na comunidade japonesa, com método de abordagem em nível de *midpoint* e *endpoint*. Na Figura 18, são apresentadas as categorias de impacto para este método (ECOINVENT, 2018).



FIGURA 18 – CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DO MÉTODO LIME (FONTE: ADAPTADO, ECOINVENT, 2018).

O quadro 5 apresenta uma síntese das principais informações dos métodos apresentados.

Quadro 5 – Informações dos Métodos de Impacto Ambiental

Nome do Método	Principais Informações
<i>Eco-Indicator 99</i>	Classificado como método de <i>endpoint</i> ; Nível de abrangência global na maioria das principais categorias de impacto ambiental.
<i>CML 2002</i>	Classificado como método de <i>midpoint</i> ; Estruturado com base na Norma ISO 14040. Nível de abrangência Global.
ReCiPe	Estruturado de maneira uniforme para análises e avaliações nos níveis de <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>; Abrangência glogal e européia para casos específicos.
<i>Impact 2002+</i>	Trata categorias de impacto ambiental em nível <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> ; Nível de abrangência europeu.
<i>Impact World+</i>	Desenvolvido por um grupo de 6 instituições de pesquisa e uma empresa da iniciativa privada classificado como um método de avaliação em nível <i>midpoint</i> de abrangência global.
<i>LUCAS</i>	Método canadense criado a partir de um compilado dos métodos já existentes, classificado em nível <i>midpoint</i> e sua abrangência tange o Canadá em todas as categorias de impacto ambiental e mudança climática e depleção do ozônio em escala global.
<i>LIME</i>	Método japonês com abordagem em nível de <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> ; Atende principalmente o Japão em todas as suas categorias de impacto ambiental, com possibilidade de escala global.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.2 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO EM ACV

Existem alguns *softwares* de simulação computacional de dados, em que são inseridas as informações de extração de recursos naturais, dados de energia elétrica e processos de manufatura, todos com base na estrutura da norma ISO 14040 e ISO 14044. Em seguida são apresentados os principais *softwares*.

2.3.2.1 SIMAPRO

O *software SimaPro*, é uma ferramenta de simulação computacional desenvolvida pela comunidade europeia e difundido em mais de 80 países, capaz de integrar os dados de inventário de um insumo e produto, que combina os resultados inseridos com os das bases de dados disponíveis. Esta ferramenta permite efetuar os cálculos de entrada e saída do objeto de estudo, pertinente a AICV, resultando em relatório de categorias de impacto ambientais, que auxilia na composição da ACV (*SimaPro*, 2018).

2.3.2.2 OPEN LCA

Conhecido por ser o único *software* de simulação de dados voltado a ACV sem custo de instalação e utilização pela comunidade acadêmica e empresarial, tendo ressalvas para o custo relacionado ao banco de dados e recursos específicos para construção de relatórios. Apresenta fácil disposição de modelagem e inserção dos dados, bem como aceite para os principais métodos de AICV (*Open LCA*, 2018).

2.3.2.3 GABI

Desenvolvido na Alemanha pela Universidade de Stuttgart, possui um banco de dados próprio em escala global, disponibilidade para utilização da base de dados *EcolInvent*. Utilizado como ferramenta de apoio para tomada de decisão quanto aos processos produtivos a partir da contabilização dos dados de ICV compondo dados de ACV, conforme o método de AICV (*GaBi*, 2018).

2.3.2.4 UMBERTO

Elaborado em Hamburg no Instituto de Informática Ambiental (IIA) na Alemanha, tem uma aplicação voltada a geração de fluxogramas para otimização do consumo de energia elétrica e de materiais em apoio as práticas da ACV

(Umberto, 2018). As principais informações se encontram presentes no Quadro 6.

Quadro 6 – Informações dos *Softwares* de Simulação Computacional

Nome do <i>Software</i>	Informações
<i>SimaPro</i>	Ferramenta paga com ampla capacidade de processamento e banco de dados.
<i>Open LCA</i>	Ferramenta gratuita com limitação de informações de seu conteúdo de base de dados.
<i>GaBi</i>	Desenvolvido e amplamente utilizado na Alemanha, possui banco de dados para suas especificações geográficas, porém possui disponibilidade para utilização da base de dados universais.
<i>Umberto</i>	Também desenvolvido na Alemanha uma aplicação para o setor elétrico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 APLICAÇÕES DA ACV

Dentro do contexto da ACV, a existência de poucos dados de desempenho ambiental para a indústria metal mecânica dificulta a compreensão, a avaliação, o mapeamento, a prevenção e a minimização de possíveis impactos socioambientais vinculados aos processos produtivos.

Outros importantes segmentos produtivos são as indústrias: químicas, medicamentos, metalúrgicas, aeronáutica e aeroespacial, responsáveis pela poluição do ar, dos solos e rios, com os seus diversos tipos de resíduos resultantes dos processos de produção e do uso de seus produtos (POPEK, 2017).

Com relação ao setor de energia, a poluição do ar é um dos agravantes deste setor, em que a queima de combustível de origem fóssil dá origem a diversos poluentes que contribuem com o aquecimento global, como o monóxido e o

dióxido de carbono, os hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio (JORGE et al., 2012).

O setor da indústria eletroeletrônica é um dos que mais evoluíram nas últimas décadas, e ainda se mostra com potencial de evolução. Este setor teve marcos importantes com o desenvolvimento de produtos e soluções tecnológicas de elevados alcance sociais, como o rádio, telefone, televisão, computadores, celulares, *tablets*, *smartphones*, *smarttv*, e uma variedade de outros aparelhos eletroeletrônicos. Não obstante, o setor de equipamentos elétricos apresentou evolução semelhante, em que se destacam os transformadores de baixa de alta potência (IEA, 2014).

Entretanto, nem todas as empresas produtoras de materiais e equipamentos elétricos; assim como as companhias do setor energético, voltadas à geração de energia elétrica, atuam efetivamente no sentido de promover produção sustentável em seus projetos, de modo que abrem espaço para a aplicação dos conceitos de normas da ACV-E (Avaliação do Ciclo de Vida Energético).

Os trabalhos de aplicação da ACV se apresentam nas mais diversas áreas, a seguir são apresentadas algumas tabelas com trabalhos utilizando a ferramenta de ACV. Na Tabela 3, são apresentados trabalhos no campo das edificações.

Tabela 3 - ACV na Engenharia Civil

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Materials life cycle assessment of a living building</i>	Gardner, Haley ; Garcia, Julissa ; Hasik, Vaclav ; Olinzock, Maureen ; Banawi, Abdulaziz ; Bilec, Melissa M.	2019	Apresenta a ACV de uma edificação, em que o ICV foi construído para analisar os impactos ambientais provenientes dos materiais presentes no setor estrutural, mecânico, hidráulico, elétrico e arquitetônico.
<i>Life Cycle Assessment Applied to Circular Designed Construction Materials</i>	Zanni, Sara ; Simion, Isabela Maria ; Gavrilescu, Mariana ; Bonoli, Alessandra	2018	Aborda aplicação do uso da ACV em conjunto com a economia circular, com o reuso de resíduo da construção civil na construção de novas edificações.
<i>A Framework to Understand Effect of Building Systems Deterioration on Life Cycle Energy</i>	Thomas, Albert ; Menassa, Carol C. ; Kamat, Vineet R	2015	Apresenta o desenvolvimento de uma estrutura para entender o efeito de deterioração dos sistemas construtivos voltados aos sistemas de instalações elétricas.
<i>A Life Cycle Modeling Framework</i>	Song, Dan ; Chen, Bin	2014	Abordam a construção de um modelo para uma estrutura do

Fonte: Elaborada pelo autor.

Thomas *et.al* (2015), trabalharam no desenvolvimento de uma estrutura para entender o efeito de deterioração dos sistemas construtivos voltados aos sistemas de instalações elétricas. Com o intuito de diminuir o consumo de EE da edificação monitorando os circuitos do ponto de vista qualidade dos condutores apoiados no ciclo de vida.

Já Song e Chen (2014), construíram um modelo de estrutura do ciclo de vida a ser empregado na indústria cimenteira contabilizando as emissões de GEE, motivamos pela vasta de demanda de utilização de cimento para construção de edificações atreladas ao crescimento populacional.

No trabalho sobre ACV de um edifício residencial, Gardner *et.al* (2019), um ICV foi construído para analisar os impactos ambientais provenientes dos materiais presentes no setor estrutural, mecânico, hidráulico, elétrico e arquitetônico, destacando o uso sustentável dos recursos em todas as etapas construtivas.

ZANNI *et.al* (2018), fazem uso da ACV combinada com a economia circular, com o reuso de resíduo da construção civil em elaboração de novas edificações, contribuindo com dados positivos no cenário do uso e poluição do solo (diminuição em até 39%).

Os trabalhos desenvolvidos no campo dos sistemas elétricos são apresentados na Tabela 4, de maneira geral eles se apresentam em aplicações de sistemas elétricos com a utilização de fontes renováveis como: tratamento do fim do ciclo de vida dos materiais de pás eólicas (KALKANIS *et. al*, 2019); discussão sobre ACV em sistemas fotovoltaicos (WANG, 2019); ACV utilizada como método comparativo de desempenho de sistemas de refrigeração entre uma planta convencional e outra abastecida com sistema fotovoltaico (BECCALI *et.al*, 2014), todos com foco na contabilização da quantidade de poluentes e emissões de GEE.

Tabela 4 – ACV na Energia

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods</i>	Kalkanis, K. ; Psomopoulos, C.S. ; Kaminaris, S. ; Ioannidis, G. ; Pachos, P.	2019	Aborda métodos para o tratamento dos materiais no fim do ciclo de vida de pás eólicas.
<i>Comparative Life Cycle Assessment of Silicon Nanowire and Silicon Nanotube Based Lithium Ion Batteries for Electric Vehicles</i>	Wang, Fenfen ; Deng, Yelin ; Yuan, Chris	2019	Apresenta uma ACV com escopo de comparação entre duas tipologias de baterias para veículos elétricos.
<i>Comparative Assessment of the Environmental Impacts of Hydro-Electric, Nuclear and Wind Power Plants in China: Life Cycle Considerations.</i>	Wang, Like ; Wang, Yuan ; Zhou, Zhihua ; Garvlehn, McSimon P. ; Bi, Fenfen	2018	Apresenta os aspectos da avaliação de potenciais impactos ambientais de usinas hidroelétricas, nucleares e eólicas na China.
<i>Environmental life cycle assessment and techno-economic analysis of triboelectric nanogenerators</i>	Ahmed, A. ; Hassan, I. ; Ibn-Mohammed, T. ; Mostafa, H. ; Reaney, I.M. ; Koh, L.S.C. ; Zu, J. ; Wang, Z.L.	2017	Apresenta uma ACV sobre os casos dos nanogeradores, com base também em uma análise técnico-econômica.
<i>Analysis of optimum scale of biomass gasification combined cooling heating and power (CCHP) system based on life cycle assessment(LCA)</i>	Yang, Kun ; Zhu, Neng ; Yuan, Tianhao	2017	Apresenta uma análise em escala sobre sistemas de gaseificação de biomassa, com base nos procedimentos indicados pela ACV.
<i>LCA of electricity networks: a review</i>	Gargiulo, Alessia; Girardi, Pierpaolo; Temporelli Andrea	2017	Apresenta uma RSL com 16 trabalhos que abordam ACV ligados a rede de eletricidade considerando os aspectos da ISO 14040.
<i>Sustainability Assessment of Complex Energy Systems Using Life Cycle Approach- Case Study: Arizona State University Tempe Campus</i>	Moslehi, S. ; Arababadi, R.	2016	Aborda a temática da ACV para o desenvolvimento de uma avaliação da sustentabilidade dos sistemas complexos de energia elétrica para o Campus da Universidade do Estado de Arizona.
<i>Life Cycle Assessment of Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage</i>	Raluy, Rosa Gemma ; Serra, Luis M. ; Guadalfajara, Mateo ; Lozano, Miguel A.	2014	Apresenta ACV relacionada aos sistemas de aquecimento, quantificando a emissão de poluentes na atmosfera.
<i>Life Cycle Assessment of Wireless BTS to Reduce Carbon Footprints</i>	Kumar, Mr. Amit ; Singh, Mr. Tanvir ; Verma, Mr. Anupam ; Liu, Yunfei	2014	Apresenta ACV destinada ao produto <i>Base Transceiver Station (BTS)</i> e possível redução da emissão de CO ₂ /pegada de Carbono

<i>Discussion on Environment Impact Assessment in the Lifecycle of PV Systems</i>	Zhang, Jia ; Lv, Fang ; Zhang, Lei	2012	Apresenta uma discussão sobre a avaliação dos potenciais impactos ambientais para os sistemas fotovoltaicos existentes.
<i>Life Cycle Assessment Performance Comparison of Small Solar Thermal Cooling Systems with Conventional Plants Assisted with Photovoltaics</i>	Beccali, Marco ; Cellura, Maurizio ; Finocchiaro, Pietro ; Guarino, Francesco ; Longo, Sonia ; Nocke, Bettina	2012	Apresenta resultados de uma ACV destinada a comparar o desempenho de sistemas de refrigeração entre uma planta convencional e outra abastecida com sistema fotovoltaico.
<i>Life Cycle Assessment of electricity transmission and distribution - part 1: power lines and cables</i>	Jorge, Raquel Santos; Hawkins, Troy R.; Hertwich, Edgar G.	2011	Aborda a ACV realizada para os componentes presentes nas linhas de potência e cabos elétricos.
<i>Life Cycle Assessment of electricity transmission and distribution - part 2: transformers and substation equipment</i>	Jorge, Raquel Santos; Hawkins, Troy R.; Hertwich, Edgar G.	2011	Apresenta ACV com foco nos potenciais impactos ambientais relacionados aos equipamentos de subestações e transformadores presente na rede elétrica de energia elétrica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ampliando destaque para os 3 últimos trabalhos presentes na tabela que são voltados a rede elétrica de energia, em que o trabalho intitulado “*LCA of electricity networks: a review*”, em que apresentou 16 trabalhos da área elétrica baseados na ISO 14040, todos os estudos mapeados no trabalho, falam da importância de efetuar análises voltadas a categorias de impacto como: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio e acidificação terrestre (GARGIULO, GIRARDI e TEMPORELLI, 2017).

Posicionando que a diversificação do uso de matrizes energéticas a partir de fontes renováveis são prudentes para diminuição dos impactos ambientais (GARGIULO, GIRARDI e TEMPORELLI, 2017).

No trabalho: “*Life Cycle Assessment of electricity transmission and distribution - part 1: power lines and cables*”, a ACV foi realizada para os componentes presentes nas linhas de potência e cabos elétricos. Os impactos ambientais calculados apontaram que a produção de metais utilizados nos cabos elétricos são os componentes com maior carga ambiental (JORGE, HAWKINS e HERTWICH, 2011).

O mesmo grupo de pesquisadores também publicou o estudo: “*Life Cycle Assessment of electricity transmission and distribution - part 2: transformers and substation equipment,*”, com foco nos impactos ambientais dos equipamentos de subestações e transformadores, em que os transformadores apresentaram maior contribuição dentre as categorias de impacto analisadas, como por exemplo em mudanças climáticas (JORGE, HAWKINS e HERTWICH, 2011).

Em ambos os estudos, os resultados são positivos quando direcionados a efetuar a reciclagem dos materiais após o fim do ciclo de vida deles, minimizando assim os índices de poluição e também do consumo dos recursos naturais, bem como trabalhar no desenvolvimento de novos equipamentos com a utilização de tecnologias sustentáveis (JORGE, HAWKINS e HERTWICH, 2011).

Com relação ao setor de energia, a poluição do ar é um dos agravantes deste setor, em que a queima de combustível de origem fóssil dá origem a diversos poluentes que contribuem com o aquecimento global, como o monóxido e o dióxido de carbono, os hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio (JORGE et al., 2011).

No caso da Manufatura, os estudos com o emprego da ferramenta de ACV são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – ACV na Manufatura

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Exploring the Opportunities of System of Systems Engineering to Complement Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering</i>	Mennenga, Mark ; Cerdas, Felipe ; Thiede, Sebastian ; Herrmann, Christoph	2019	Apresenta oportunidades dos sistemas de engenharia sob a ótica da sustentabilidade e engenharia do ciclo de vida
<i>Towards sustainable production: a methodology to assess influences between life cycle phases in tool manufacturing</i>	Gränebaum, Timm ; Hermann, Lennard ; Trauth, Daniel ; Bergs, Thomas	2019	Aborda o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar as influências entre das fases do ciclo de vida para a fabricação de ferramentas.
<i>Incorporating unit manufacturing process models into life cycle assessment workflows</i>	Bernstein, William Z. ; Tamayo, Cesar D. ; Lechevalier, David ; Brundage, Michael P.	2019	Apresenta modelos de processos de fabricação sob a perspectiva da ACV.
<i>LCA and Eco-design: Consequential and Attributional</i>	Venkatachalam, Venkateshwaran ;	2018	Apresenta a abordagens atribucionais e

<i>Approaches for Bio-based Plastics</i>	Spierling, Sebastian ; Horn, Rafael ; Endres, Hans-Josef		consequenciais da ACV e do <i>Eco-design</i> com foco em plásticos biológicos.
<i>Combining ex-ante LCA and EHS screening to assist green design: A case study of cellulose nanocrystal foam</i>	Tan, Lianghui ; Mandley, Steven J. ; Peijnenburg, Willie ; Waaijers-van der Loop, Susanne L. ; Giesen, Daniel ; Legradi, Jessica B. ; Shen, Li	2018	Apresenta um estudo de caso sobre a espuma nanocristal de celulose com abordagem da ACV voltado para o <i>design</i> verde.
<i>A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes - A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste</i>	Gear, Matthew ; Sadhukhan, Jhuma ; Thorpe, Rex ; Clift, Roland ; Seville, Jonathan ; Keast, Mike	2018	Apresenta um compilado de ferramentas do campo da ACV, com direcionamento a um estudo de caso para o processo de craqueamento térmico para resíduos de plástico misto.
<i>Literature Reviews: Life Cycle Assessment in the Context of Product-Service Systems and the Textile Industry</i>	Piontek, Felix M. ; MÄ¼ller, Martin	2018	Apresenta uma RSL com foco na ACV para sistemas de produto no campo da indústria têxtil.
<i>Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System</i>	Cerdas, Felipe and Juraschek, Max and Thiede, Sebastian and Herrmann, Christoph	2017	Apresenta uma ACV de produtos impressos em 3D com sistema de manufatura distribuída.
<i>Sustainable Lightweight Design -Relevance and Impact on the Product Development & Lifecycle Process</i>	Kaspar, Jerome ; Vielhaber, Michael	2017	Mostra a relevância do design sustentável no desenvolvimento de produto e do seu ciclo de vida.
<i>Concurrent Design & Life Cycle Engineering in Automotive Lightweight Component Development</i>	Kaluza, Alexander ; Kleemann, Sebastian ; FrÄ¼hlich, Tim ; Herrmann, Christoph ; Vietor, Thomas	2017	Apresenta relação entre engenharia do ciclo de vida de componentes automotivos.
<i>Reinterpreting the LCA Standard Procedure for PSS</i>	Dal Lago, Marco ; Corti, Donatella ; Wellsandt, Stefan	2017	Aborda a reinterpretação do procedimento padrão da ACV para o PSS.
<i>A Lifecycle-enhanced Global Manufacturing Platform for Enterprises</i>	Mengarelli, Marco ; Marconi, Marco ; Germani, Michele	2016	Aborda o desenvolvimento de uma plataforma de manufatura global e ciclo de vida destinada a empresas.
<i>PLANTLCA: A Lifecycle Approach to Map and Characterize Resource Consumptions and Environmental Impacts of Manufacturing Plants</i>	Favi, Claudio ; Germani, Michele ; Mandolini, Marco ; Marconi, Marco	2016	Abordagem do ciclo de vida para mapeamento e caracterização do consumo de insumos e seus potenciais impactos ambientais em indústrias.
<i>Interaction between New Car Design and Recycling Impact on Life Cycle Assessment</i>	Soo, Vi Kie ; Compston, Paul ; Doolan, Matthew	2015	Apresenta a interação entre o impacto da reciclagem de materiais e seu emprego no design de um novo automóvel e a relação com a ACV.

<i>An Approach to Sustainable Product Lifecycle Management (Green PLM)</i>	Vila, C. ; Abellán-Nebot, J.V. ; Albiñana, J.C. ; Hernández, G.	2015	Apresenta critérios de gestão sustentável do ciclo de vida de produto.
<i>Eco-Process Engineering System for Composition of Services to Optimize Product Life-Cycle (EPES)</i>	Armijo, A. ; Zuloaga, J. ; Vega, A. ; Sorli, M.	2015	Aborda o conceito de Eco-processos para composição de serviços a fim de otimizar o ciclo de vida do produto.
<i>Productive and environmental performance indicators analysis by a combined LCA hybrid model and real-time manufacturing process monitoring: A grinding unit process application</i>	Filleti, Remo A.P. ; Silva, Diogo A.L. ; Silva, Eraldo J. ; Ometto, Aldo R.	2017	Aplicação da ACV combinada com o monitoramento de processo de manufatura.
<i>Reusability based on Life Cycle Sustainability Assessment: Case Study on WEEE</i>	Lu, Bin ; Li, Bo ; Wang, Lihui ; Yang, Jianxin ; Liu, Jingru ; Wang, Xi Vincent	2014	Aborda os benefícios da reutilização dos REEE com base na avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A ferramenta de ACV na manufatura pode ser empregada em qualquer atividade fim, mas os estudos presentes na tabela apresentam as seguintes aplicações: desenvolvimento de produto, sistemas de manufatura distribuída, plásticos, celulose, metalurgia, design verde, gerenciamento sustentável, engenharia de processos, todos englobando o uso eficiente dos recursos naturais e minimização da emissão de poluentes.

Tangendo o campo dos materiais, a ACV já foi empregada em estudos direcionados em nano materiais de isolamento; materiais de construção de materiais, fortalecimento de construção de ICV para estruturas soldadas, conforme apresenta a Tabela 6.

Tabela 6 – ACV Materiais

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Using engineering documentation to create a data framework for life cycle inventory of welded structures</i>	Favi, Claudio ; Campi, Federico ; Mandolini, Marco ; Germani, Michele	2019	Apresenta a utilização da documentação de engenharia para o desenvolvimento do ICV de estruturas soldadas.
<i>Life Cycle Assessment Applied to Circular Designed Construction Materials</i>	Zanni, Sara ; Simion, Isabela Maria ; Gavrilesco, Mariana ; Bonoli, Alessandra	2018	Apresenta ACV com foco em materiais da construção civil.
<i>Nano Insulation Materials: Synthesis and Life Cycle Assessment</i>	Gao, Tao ; Sandberg, Linn Ingunn C. ; Jelle, Björn Petter	2014	Apresenta ACV de nano materiais de isolamento.
<i>Life Cycle Engineering for Materials and Technology Selection: Two Models, One Approach</i>	Peasas, Paulo; Ribeiro, Inas; Henriques, Elsa	2014	Aborda a utilização da engenharia do ciclo de vida para seleção de materiais e tecnologias para o setor de materiais.

Fonte: Elaborada pelo autor.

No campo dos materiais os estudos de ACV nessa temática têm apresentado progressos em estudos de casos de empresas na China revelando por exemplo que houve redução de impacto ambiental de todas as categorias analisadas, quando mudanças e ajustes dos índices do consumo de insumos dos recursos utilizados são reduzidos (ZANNI *et.al*, 2018).

No caso de nanomateriais isolantes, ao realizar a ACV identificou-se que o consumo de eletricidade durante a sua manufatura, gera carga ambiental principalmente sobre emissões de CO₂. ACV realizada sobre este tipo de material, mostrou que o etanol como catalisador utilizado no processo é apresentado como uma desvantagem indicando que o mesmo pode ser substituído por silicato de sódio, trazendo economia ambiental ao processo (GAO *et.al*, 2014).

A ACV também é utilizada em aplicações mais teóricas, como por exemplo nos casos em que ela é associada à tomada de decisão, conforme expresso na Tabela 7.

Tabela 7 – ACV Teoria

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Life Cycle Rating - An approach to support the decision-making process of manufacturing systems</i>	Müller, Andreas ; Bornschlegl, Martin ; Mantwill, Frank	2018	Apresenta abordagem de classificação do ciclo de vida como fonte de apoio para a tomada de decisão em sistemas de manufatura.
<i>A Life Cycle Ecological Sensitivity Analysis Method for Eco-Design Decision Making of Machine Tool</i>	Zeng, Dan ; Cao, Huajun ; Jafar, Salman ; Tan, Yifei ; Su, Shu	2018	Apresenta o desenvolvimento de um método de análise de sensibilidade ecológica do ciclo de vida para tomada de decisão do Eco-design de máquina-ferramenta.
<i>Life cycle analysis: comparison between different methods and optimization challenges</i>	Stavropoulos, Panagiotis; Giannoulis, Christos; Papacharalampopoulos, Alexios; Foteinopoulos, Panagis; Chryssolouris, George	2016	Aborda o campo da teoria da ACV como fonte de comparação entre métodos e seus desafios para otimização.
<i>Life Cycle Assessment Tool in Product Development: Environmental Requirements in Decision Making Process</i>	Luglietti, Rossella ; Rosa, Paolo ; Terzi, Sergio ; Taisch, Marco	2016	Aborda a utilização da ferramenta ACV no desenvolvimento de produtos e na tomada de decisão, considerando requisitos ambientais.
<i>Integrating Life-cycle Assessment into Transport Cost-benefit Analysis</i>	Manzo, Stefano ; Salling, Kim Bang	2016	Aborda a integração da ACV na análise do custo benefício do ponto de vista do transporte.
<i>Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment</i>	Abdallah, Tarek ; Farhat, Ali ; Diabat, Ali ; Kennedy, Scott	2012	Aborda a formulação e ACV sobre cadeia de suprimento verde e o comércio de carbono.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos trabalhos apresentados na tabela anterior, é possível constar que a aplicação da ACV em propósitos mais teóricos foi abordada em temas como: tomada de decisão em otimização de processos, tomada de decisão em sistemas de manufatura, tomada de decisão para desenvolvimento de produtos ambientalmente corretos e cadeia de suprimentos verdes.

2.5 MODELOS DE SUSTENTABILIDADE

Assim como na primeira parte de RSL, para essa segunda parte foram utilizadas as bases de dados: *Science Direct*, *Scopus*, e *Web of Science*. A *string* de busca utilizada para esta seção da RSL é apresentada no Quadro 7.

Quadro 7 – *String* de busca associadas.

("Life Cycle Assessment") AND ("Sustainability Model")

Para a busca e seleção dos artigos para o tema pesquisado na atual seção foram realizadas algumas tentativas de inserir na *string* de busca a palavra-chave: transformador de potência, no entanto ao inserir a palavra, a busca se concluiu com zero documentos encontrados.

O espaço temporal para a busca foram os últimos 10 anos, já considerando aqui parte do ano de 2020. Com a atual *string* de busca foram encontrados inicialmente 179 documentos, dos quais 109 foram aceitos e 70 rejeitados na primeira fase de seleção dos artigos, seguindo os mesmos critérios de inclusão e exclusão do Quadro 4.

Os 109 artigos aceitos na etapa anterior foram então avaliados de maneira criteriosa, buscando informações pertinentes ao tema analisado para a construção desta tese. Resultando em 47 artigos aceitos e 62 artigos rejeitados, a distribuição da quantidade de artigos publicados ao longo dos anos são apresentados do gráfico da Figura 19.



FIGURA 19 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS POR ANO.

Analisando os dados presentes no gráfico de distribuição dos artigos publicados por ano, têm-se: os anos de 2010 e 2011 com um documento publicado; 2013 e 2014 com 2 documentos; 2015 possui 3 artigos publicados; 2012 com 4 documentos; 2017 e 2020 com 5 arquivos; 2016 e 2018 contendo 6 documentos e o ano de 2019 com o maior pico de publicações com 12 documentos.

Apesar da busca por documentos ter sido realizada em 3 bases de dados diferentes, após a extração das informações apenas duas destas bases permaneceram na fase final de seleção de documentos como ilustrado no gráfico da Figura 20.

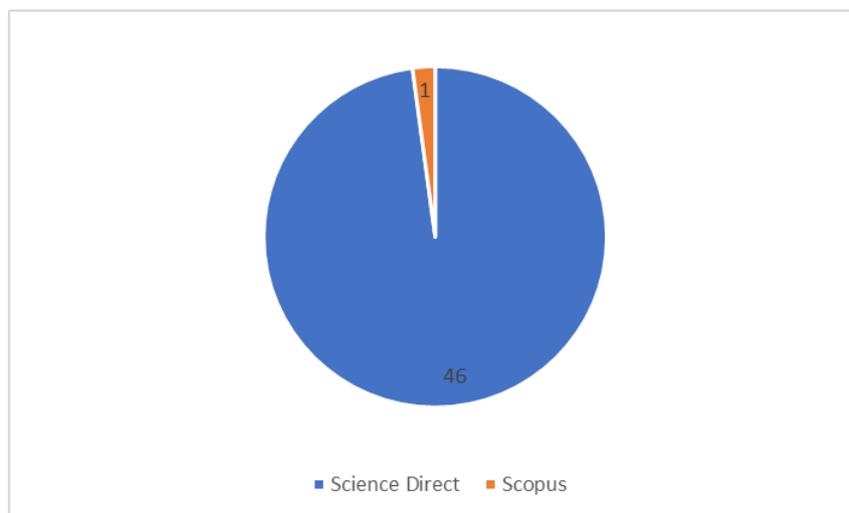


FIGURA 20 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS ENTRE AS BASES DE DADOS.

No gráfico da Figura 20, é possível identificar que as 2 bases que contém artigos selecionados são: *Science Direct* com 46 arquivos e a *Scopus* com 1 arquivo. Mapeando as revistas responsáveis pela publicação dos documentos, todas são apresentadas na Figura 21.

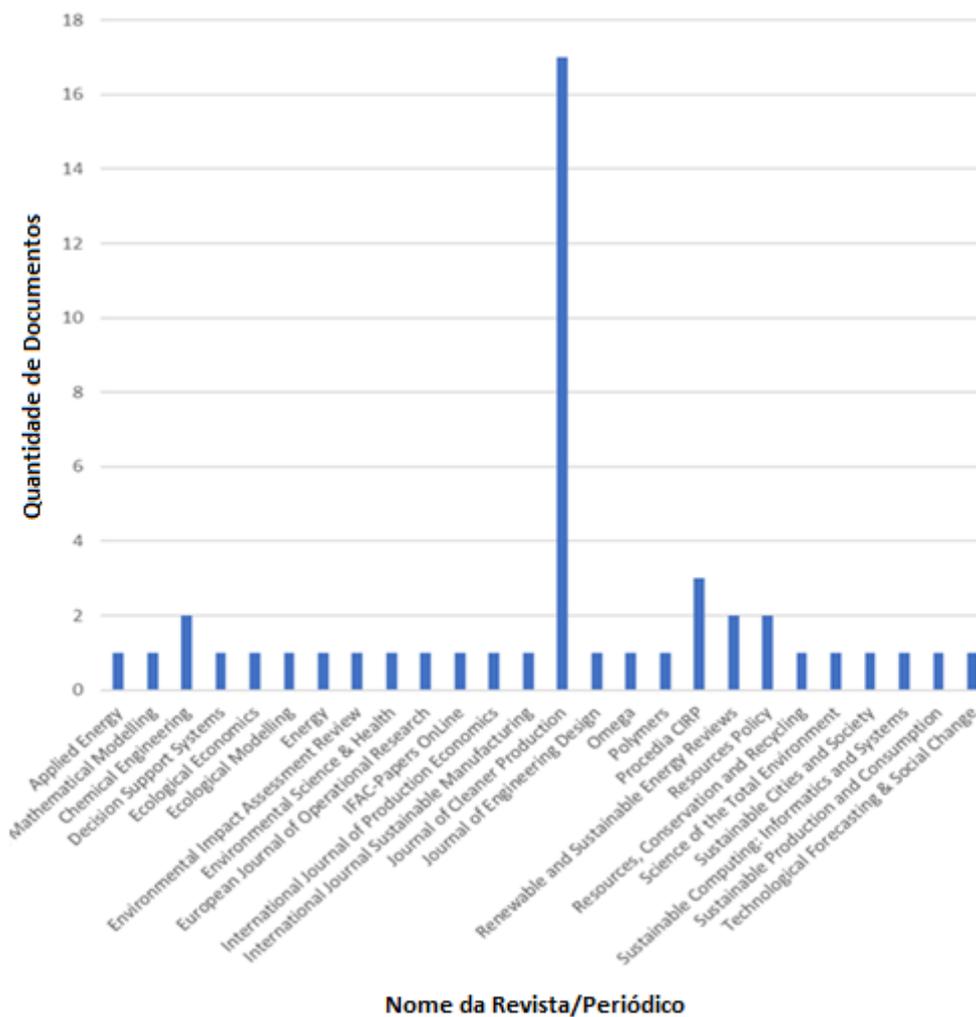


FIGURA 21 – GRÁFICO COM A DISTRIBUIÇÃO DAS REVISTAS.

Os artigos foram distribuídos em 26 revistas diferentes, das quais *Journal of Cleaner Production* possui 17 artigos e *Procedia CIRP* com 3 publicações. As palavras-chaves mais utilizadas nos artigos são apresentadas na nuvem de palavras da Figura 22.

SUSTAINABLE-DEVELOPMENT

SUSTAINABILITY

LIFE-CYCLE-ASSESSMENT

LCA

FIGURA 22 – GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE, PARA SEGUNDA PARTE DA RSL.

De maneira sintetizada o mapeamento quantitativo dos dados bibliométricos apresentam nuvem de palavras que externa os termos utilizados como palavras-chave de maior frequência são respectivamente: *sustainability*, *life cycle assessment*, *sustainable development* e *LCA*. A base de dados *Science Direct* para esta busca também se apresentou com maior participação de indexação dos artigos encontrados (46 de um total de 47 artigos), crescente número de publicações desde o ano de 2012, o periódico *Journal of Cleaner Production* se destaca com 17 documentos publicado dentre os 47 identificados a partir da *string* de busca presente no início desta seção.

Essa segunda parte da RSL, visa identificar na literatura os trabalhos publicados com o tema: “modelos de sustentabilidade” e áreas afins. Sobre este feito na Tabela 8, são apresentados 31 trabalhos relacionados ao tema indicado.

Tabela 8 – Modelos de Sustentabilidade

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Sustainable waste management systems</i>	Jeffrey K. Seadon	2020	Aborda uma discussão sobre a temática a utilização de sistemas de gestão de resíduos.
<i>Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues</i>	Armando Calabrese, Roberta Costa, Nathan Leviaidia, Tamara Menichinib,	2020	Utilização do método AHP para integração da tomada de decisão e sustentabilidade para seleção de questões da sustentabilidade.
<i>Sustainability assessment of integrated forest biorefinery implemented in Canadian pulp and paper mills</i>	Bechir Ben Daya, Mustapha Nourelfath	2020	Apresenta uma avaliação da sustentabilidade de uma bio-refinaria florestal de indústrias de papel e celulose.
<i>Toward an Asian corporate sustainability model: An integrative review</i>	Nuttasorn Ketprapakorn	2019	Apresenta uma revisão integrativa sobre o modelo asiático de sustentabilidade.
<i>Sustainability assessment procedure for operations and production processes (SUAPRO)</i>	Feni Agostinho, Thames Richard Silva, Cecília M.V.B. Almeida, Gengyuan Liu, Biagio F. Giannetti	2019	Aborda procedimento de avaliação de sustentabilidade voltada para operações e processos de produção.
<i>Preparation for reuse activity of waste electrical and electronic equipment: Environmental performance, cost externality and job creation</i>	Martina Pini, Francesco Lolli, Elia Balugani, Rita Gamberini, Paolo Neri, Bianca Rimini, Anna Maria Ferrari	2019	Aborda quesitos da reutilização de REEE, desempenho ambiental, custos e geração de empregos para o setor.
<i>Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study</i>	Mikel Zubizarretab, Jesús Cuadradoa, Aimar Orbea, Harkaitz Garcíaa	2019	Apresenta um estudo de caso a respeito da aplicação da sustentabilidade ambiental de estruturas de madeira.
<i>Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future</i>	Bruno S. Silvestre, Diana Mihaela T, írca	2019	Aborda inovações a respeito do desenvolvimento sustentável.
<i>Five sector sustainability model: A proposal for assessing sustainability of production systems</i>	Biagio F. Giannettia, Fábio Sevegnania, Cecília M.V.B. Almeidaa, Feni Agostinhoa, Roberto R. Moreno Garcíab, Gengyuan Liuc	2019	Apresenta proposta de avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção.
<i>Editorial overview: Energy, environment & sustainability: sustainability modeling</i>	Heriberto Cabezas	2019	Aborda os aspectos gerais sobre a modelagem da sustentabilidade considerando o meio ambiente e a relação com o uso da energia.

<i>Integrated sustainability assessment for a bioenergy system: A system dynamics model of switchgrass for cellulosic ethanol production in the U.S. midwest</i>	Enze Jin, Gamini P. Mendis, John W. Sutherland	2019	Apresenta uma avaliação de sustentabilidade integrada para um sistema de bioenergia voltado a produção de etanol no oeste dos EUA.
<i>Engineering, markets, and human behavior: an essential integration for decisions toward sustainability</i>	Bhavik R Bakshi, Tapajyoti Ghosh and Kyuha Lee	2019	Visão dos aspectos principais para integração de decisões para o caminho sustentável.
<i>The compatibility of controlled power plants with self-sustainable models using a hybrid input/output and water-energy-carbon nexus analysis</i>	Pouya Ifaei, ChangKyooy Yoo	2018	Apresenta cenário de comparação de usinas de energia com modelos auto-sustentáveis, considerando: água, energia e emissão de carbono.
<i>Sustainable qualifying criteria for designing circular business models</i>	Marina de Pádua Pieronia, Daniela C. A. Pigossoa, Tim C. McAlonea	2018	Apresenta critérios de qualificação sustentável para a concepção de modelos de negócios circulares.
<i>Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse</i>	Massimiliano Sgroi, Federico G. A. Vagliasindi and Paolo Roccaro	2018	Aborda conceitos e a viabilidade da sustentabilidade e economia circular no reuso da água.
<i>Development of a systematic framework for sustainability management of organizations</i>	Waqas Nawaz, Muammer Koç	2018	Aborda o desenvolvimento de uma estrutura sistemática para a gestão da sustentabilidade das organizações.
<i>A Quantitative Approach for Assessing Sustainability Performance of Corporations</i>	Payman Ahia, Cory Searcyb, Mohamad Y. Jaberb	2018	Apresenta o uso da abordagem quantitativa para avaliar o desempenho de sustentabilidade de empresas.
<i>Towards Sustainability Assessment of Machining Processes</i>	H.A. Hegab, B. Darras, H.A. Kishawy	2017	Aborda sobre a avaliação da sustentabilidade dos processos de usinagem.
<i>Investigation on a Novel Sustainable Model for Waste Management in Megacities: A Case Study in Tehran Municipality</i>	M.A. Edalatpour, S.M.J. Mirzapour Al-e-hashem, B. Karimi, B. Bahli	2017	Aborda perspectivas de um novo modelo sustentável para gestão de resíduos em cidades de grande porte.
<i>Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry</i>	Andre Luís Helleno, Aroldo Jose Isaias de Moraes, Alexandre Tadeu Simon	2017	Aborda a integração de indicadores de sustentabilidade e <i>Lean Manufacturing</i> para avaliação de processos de manufatura na indústria brasileira.
<i>An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models</i>	Johannes Cornelis de Man, Jan Ola Strandhagen	2017	Aborda o desenvolvimento de uma agenda destinada ao desenvolvimento de

			modelos de negócios sustentáveis para indústria 4.0.
<i>Sustainable coal consumption and energy production in India using life cycle costing and real options analysis</i>	Vivek Soni, S.P. Singh, D.K. Banwet	2016	Aborda o consumo sustentável de carvão para produção de energia na Índia com abordagem do ciclo de vida.
<i>An integrated approach to analysis and modeling of End of Life phase of the complex products</i>	S. Keivanpour; D. Ait Kadi	2016	Apresenta uma abordagem integrada para modelagem da fase de fim de vida de produtos complexos.
<i>Environmental and Safety Issues of Polymers and Polymeric Material in the Printing Industry</i>	Kirsten Radermacher	2016	Aborda as questões ambientais e de segurança de polímeros na indústria de impressão.
<i>An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine</i>	Onder Turan	2015	Quantificação de métricas para sustentabilidade da fabricação do motor turbofan.
<i>MAS2: an integrated modeling and simulation-based life cycle evaluation approach for sustainable manufacturing</i>	Ju Yeon Lee, Hyung Seok Kang, Sang Do Noh*	2014	Aborda a ACV como recurso de modelagem e simulação de manufatura sustentável.
<i>Quantifiable measures of sustainability: a case study of materials selection for eco-lightweight auto-bodies</i>	Ahmad T. Mayyas, Ala Qattawi, Abdel Raouf Mayyas, Mohammed Omar	2013	Aborda a quantificação de medidas de sustentabilidade para seleção de materiais de carrocerias.
<i>ASTRO: An integrated environment for dependability and sustainability evaluation</i>	B. Silva a, G. Calloua, E. Tavaresa, P. Maciela, J. Figueiredoa, E. Sousaa, C. Araujoa, F. Magnanib, F. Nevesb	2013	Trata sobre o ambiente integrado para avaliação de confiabilidade e sustentabilidade.
<i>Sustainability modelling and reporting: From roadmap to implementation</i>	M. Daud Ahmed, David Sundaram	2012	Apresenta um roteiro passo a passo para implementação de relatórios de sustentabilidade.
<i>Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview</i>	G. Ingarao, R. Di Lorenzo, F. Micari	2011	Aborda uma visão geral sobre os aspectos da sustentabilidade direcionando-se para os processos de conformação de chapas.
<i>The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints</i>	Gavin M. Mudda,	2010	Apresenta as tendências para a sustentabilidade da mineração tendo como estudo de caso o cenário da Austrália.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Seadon (2020), aponta que os modelos de sistemas sustentáveis para a gestão dos resíduos devem incorporar *loops de feedback*, para controlar os processos de manufatura evitando o aumento do descarte de materiais. Tendo assim um sistema dinâmico do controle de geração de resíduos e os tratar posteriormente de maneira adequada conforme o recomendado por normas de agências reguladoras especializadas.

Já Calabrese *et al.* (2020) abordam que a concepção de modelos sustentáveis, bem como a sua aplicação, deve ocorrer de maneira gradativa para as organizações, incorporando a prática de métodos matemáticos e lógica *fuzzy*, para determinação do grau de competitividade do mercado. Salientando que na prática há escassez deste tipo modelo servindo de base para a tomada de decisão.

A atual revolução industrial, conhecida como indústria 4.0, na qual se observa empresas, produtos e processos conectados, o advento das soluções eletrônicas embarcadas com a rede de *internet* aumenta a agilidade de processos de manufatura de maneira geral e promove conforto a usuários e organizações, abrindo espaço para o desenvolvimento de modelos de sustentabilidade de maneira avançada e permitindo avaliar e criar diversos cenários para o cumprimento do viés sustentável no campo do *design* do produto, cadeia de suprimentos e ecoeficiência (MAN e STRANDHAGEN, 2017).

Outra medida a ser considerada dentro dos modelos sustentáveis, é a de seleção de materiais oriundos de empresas com práticas sustentáveis, para que o modelo sustentável da empresa pressione seus fornecedores a também exercer as práticas sustentáveis (MAYYAS *et al.*, 2013).

Ahmed e Sundaram (2012), concluem que o desenvolvimento e adaptação de empresas para o campo da sustentabilidade devem incluir a modelagem de relatórios de atividades dentro da arquitetura empresarial, facilitando assim a transição para o desenvolvimento sustentável equilibrando os quesitos, ambientais, econômicos e ambientais.

Tratando sobre os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos objeto de estudo dessa pesquisa, os modelos para sustentabilidade deste setor devem ser

divididos em categorias por tipo de equipamentos e considerar etapas de tratamento dos resíduos de maneira específica para cada um deles. O atendimento do conceito de sustentabilidade atinge a sua completeza quando o desenvolvimento de novos equipamentos seja feito reaproveitando peças e componentes em bom estado para a construção de um aparelho a ser inserido novamente no mercado (PINI *et al.*,2020).

Nesta varredura na literatura, sobre modelos de sustentabilidade também foram encontrados alguns trabalhos no campo da ecoeficiência. Os trabalhos encontrados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelos em Ecoeficiência

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency</i>	Abbas Mardania, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Dalia Streimikiene, Ahmad Jusoha, Masoumeh Khoshnoudia	2020	Apresenta uma RSL com artigos publicados entre 2006 à 2015 sobre a utilização da modelagem matemática como ferramenta para avaliar eficiência energética.
<i>A conceptual framework for the eco-efficiency assessment of small and medium-sized enterprises</i>	Jenifer Vasquez, Santiago Aguirre, Carlos Eduardo Fuquene-Retamoso, Giulia Bruno, Paolo C. Priarone, Luca Settineri	2019	Abordam com destaque que o conhecimento ambiental, cultura organizacional, controle ambiental e gestão ambiental são fatores essenciais para que as empresas atinjam os patamares de ecoeficiência.
<i>Conceptual Framework for Evaluating the Environmental awareness and Eco-efficiency of SMEs</i>	Jenifer Vásques, Giulia Bruno, Luca Settineri, Santiago Aguirre	2018	Apresenta um modelo para avaliação de ecoeficiência para pequenas e médias empresas, por entender que elas também têm uma parcela expressiva de emissão de poluentes para a atmosfera.
<i>Life cycle assessment and eco-innovations: what kind of convergence is possible?</i>	Wladimir Henriques Motta, Liz-Rejane Issberner, Patricia dos Rios Prado	2016	Abordam possíveis as relações da ACV e da eco-inovação, e seus eventuais pontos de convergência.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Mardania *et al.* (2020), em sua revisão de literatura com artigos publicados entre 2006 à 2015 sobre a utilização da modelagem matemática como ferramenta para avaliar eficiência energética, chegaram a conclusão após analisarem 144 artigos, distribuídos em 45 periódicos que a eficiência energética está diretamente relacionada com a ecoeficiência. Por terem como princípio a

minimização do uso dos recursos naturais e, principalmente, o consumo de eletricidade, se revertendo em menor emissão de poluentes, indicando o uso de energias renováveis como alternativa de fonte energética para abastecimento da demanda energética.

Vásques *et.al*, (2018), pensando sobre o desenvolvimento de um modelo para avaliação de ecoeficiência para pequenas e médias empresas, por entender que elas também têm uma parcela expressiva de emissão de poluentes para a atmosfera. No modelo apresentado as atividades dessas empresas devem mensurar o seu consumo de insumos, recursos naturais, e traçar estratégias de consumir menos fabricando produtos com a mesma qualidade, investindo no treinamento de funcionários, melhorar os níveis de comunicação entre as atividades apoiado nos princípios da ecoeficiência e sustentabilidade.

Também Vásques *et.al*, (2019), em outro estudo sobre o desenvolvimento de uma estrutura conceitual para avaliação da ecoeficiência de empresas de pequeno e médio porte, entenderam que o desenvolvimento do modelo contribuirá para que as empresas presentes nestas duas modalidades pudessem ter suas atividades em níveis os mais sustentáveis possível. Desta forma destacaram que o conhecimento ambiental, cultura organizacional, controle ambiental e gestão ambiental são fatores essenciais para que as empresas atinjam os patamares de ecoeficiência.

No campo da ecoeficiência surgem trabalhos que abordam o surgimento daecoinovação, que se norteiam no desenvolvimento de soluções de inovação tecnológicas, e conseqüentemente refletir como é possível realizar a ACV dessas soluções de inovação. Os questionamentos permitem refletir sobre a construção de modelos de ecoinovação, ecoeficiência e ACV, tendo como indicadores: a pegada de carbono, emissões de poluentes, diminuição de insumos e a contribuição de ecoinovação no mercado (MOTA *et al.*, 2016).

Paralelo ao campo da ecoeficiência existe também o conceito de *design* sustentável. Durante a execução desta revisão, 5 trabalhos foram identificados abordando o tema, descritos na Tabela 10.

A literatura trata que os modelos de *design* sustentável devem atuar em três grandes níveis: estratégico (missões políticas públicas, agendas para o cumprimento de metas de implementação do *design* sustentável nas indústrias); tático (capacitação e desenvolvimento de equipes nas áreas de desenvolvimento do produto, integrando sistemas, aplicando métricas de para avaliação ambiental e socioeconômica) e operacional (responsável pela organização do processo de design e execução do produto) (ROCHA *et al.*, 2012).

Tabela 10 – Modelos em *Design* Sustentável

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review</i>	N.A. Aziz, D.A. Wahab, R. Ramli, C.H. Azhari.	2015	Aborda inserção de novos módulos de atualização no produto surge com uma estratégia competitiva no campo da sustentabilidade para prolongar o ciclo de vida do produto.
<i>A normative decision analysis method for the sustainability-based design of products</i>	Douglas C. Eddy, Sundar Krishnamurty, Ian R. Grosse, Jack C. Wileden & Kemper E. Lewis	2014	Relata que aplicações do design sustentável está relacionada com a tomada de decisão, modelos matemáticos e a sustentabilidade do produto.
<i>Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review</i>	Ahmad Mayyasa, Ala Qattawia, Mohammed Omara, Dongri Shana,	2012	Aborda que o setor manufatureiro, deve trabalhar na adaptação de seus modelos de veículos e em sua cadeia produtiva.
<i>Design for sustainability models: A multiperspective review</i>	Cristina Sousa Rocha, Paula Antunes, Paulo Partidario	2012	Apresenta uma revisão multi-perspectiva .
<i>Sustainable lightweight vehicle design: a case study of eco-material selection for body-in-white</i>	Ahmad T. Mayyas, Abdelraoof Mayyas, Ala Qattawi and Mohammed A. Omar	2012	Apresenta um estudo de caso de seleção de eco-materiais para construção da carroceria de veículo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O conceito de *design* sustentável também defende o desenvolvimento modelos de trabalho, em que a estrutura mecânica e arquitetônica dos produtos possa ser atualizada com a inclusão de novos módulos. A inserção de novos módulos de atualização no produto surge com uma estratégia competitiva no campo da sustentabilidade para prolongar o ciclo de vida do produto, surtindo efeitos na redução do impacto ambiental do produto e de custos de fabricação (AZIZ *et al.*, 2015).

Uma das aplicações do *design* sustentável está relacionada com a tomada de decisão, modelos matemáticos e a sustentabilidade do produto. O estabelecimento de modelos multicritérios, considerando variáveis como: custo de fabricação, impacto ambiental, conhecimento sobre o fluxo produtivo dos materiais que compõem o produto e técnicas de ACV (EDDY *et al.*, 2014).

Abordando o setor da indústria automotiva, Mayuasa *et al.* (2012) relatam que este setor manufatureiro, importante mundialmente, deve trabalhar na adaptação de seus modelos de veículos e em sua cadeia produtiva tanto para diminuição do uso de matéria-prima, quanto na utilização de materiais reciclados em suas linhas de montagem os autores apontam que os veículos têm um potencial de reciclagem de seus materiais em até 75%.

Outro ponto chave para aplicação do *design* sustentável é a seleção dos materiais que farão parte da concepção do produto, a análise detalhada do tipo de produto escolhido deve levar em consideração a quantidade de energia e emissões de CO₂ presente na extração, processamento dos materiais, fabricação uso e fim do ciclo de vida do material (AHMAD *et al.*, 2012).

Ao abordar a seleção de materiais essa atividade está ligada aos modelos de cadeia de suprimentos que com o surgimento da sustentabilidade, também se adaptaram a realidade de escassez dos recursos naturais e incorporam práticas verdes para fornecedores, como apontam os artigos presentes na Tabela 11 (ESKANDARPOUR *et al.*, 2015).

Tabela 11 – Modelos em Cadeia de Suprimentos

Título	Autor	Ano	Contribuição
<i>A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: A case study in a travertine quarry.</i>	Hamed Soleimani	2020	Aborda a importância de exigir dos fornecedores da cadeia de suprimentos também trabalhem para diminuição do consumo de recursos naturais.
<i>High-resolution multi-objective optimization of feedstock landscape design for hybrid first and second generation biorefineries.</i>	Trung H. Nguyena, Julien Grangerc, Deval Pandiyad, Keith Paustiana	2019	Aborda otimização multi-objetivo para seleção de matérias primas par biorrefinarias, e suas modificações para atender o mercado.
<i>Supply chain sustainability assessment with Dempster-</i>	Mahathir Mohammad Bappy,	2019	Apresenta avaliação da sustentabilidade da

<i>Shafer evidence theory: Implications in cleaner production</i>	Syed Mithun Ali a, Golam Kabir, Sanjoy Kumar Paul		cadeia de suprimentos e suas implicações na produção mais limpa.
<i>Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: Na Operations Research Perspective.</i>	Ana Paula Barbosa Povoá Catia da Silva, Ana Carvalho	2017	Aborda as oportunidades e desafios da cadeia de suprimentos sustentável.
<i>Improving corporate sustainable development by using an interdependent closed-loop hierarchical structure.</i>	Lei Shi, Kuo-Jui Wu, Ming-Lang Tseng	2016	Apresenta uma estrutura hierárquica de ciclo fechado independente para melhor o desenvolvimento sustentável de empresas.
<i>A comprehensive multidimensional framework for assessing the performance of sustainable supply chains.</i>	Payman Ahi *, Mohamad Y. Jaber, Cory Searcy	2016	Apresenta uma estrutura multidimensional para avaliação do desempenho de cadeias de suprimento sustentáveis.
<i>Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review.</i>	Majid Eskandarpour, Pierre Dejax, Joe Miemczyk, Olivier Péton	2015	Aborda uma revisão da literatura sobre o modelos e aspectos da cadeia de suprimentos sob a perspectiva ambiental, social e indicadores de emissões de gases do efeito estufa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A atualização dos modelos de cadeia de suprimentos teve como estratégia para com os seus fornecedores exigir que eles trabalhem consumindo menos eletricidade em suas atividades, diminuindo o perfil de emissão de poluentes na atmosfera (SOLEIMANI, 2020).

Outro seguimento importante de cadeia de suprimentos são as cadeias pertencentes aos combustíveis, este segmento tem degradação da natureza em diversas frentes poluidoras, pelo fato de os combustíveis servirem como insumo principal para fomentar outras atividades que também irão produzir poluição. Os modelos de cadeia de suprimentos têm se aprimorado para atender esta nova demanda do mercado (TRUNG *et al.*, 2019).

Desta forma, avaliar a sustentabilidade da cadeia de suprimentos é um sistema complexo, por isso os modelos de avaliação consideram dados estatísticos de incerteza combinados com a tomada de decisão para atividades, calculando os custos das práticas sustentáveis para as organizações (BAPPY *et al.*, 2019).

Em suma os modelos de cadeia de suprimentos atual tendem a se refinar para atender a necessidade do mercado da atualidade que leva em consideração adoção de práticas sustentáveis em todas as atividades produtivas (POVOA et al., 2017). O estabelecimento de estruturas hierarquizadas para as atividades da cadeia de suprimentos se mostra como um facilitador para o controle o desenvolvimento de insumos sustentáveis para a indústria e sociedade (SHI et al., 2016).

2.6 LOGÍSTICA REVERSA - LR

A LR atua como uma ferramenta de gestão ambiental e gestão sustentável da cadeia de suprimentos, voltada para o segmento de pós-consumo e pós-venda dos produtos e insumos provenientes de todos os produtos comercializados independente da sua aplicação ou uso. Ela se aplica aos fluxos físicos interligando de maneira reversa a empresa de manufatura (produtora/geradora de produtos e resíduos) a obter a sua matéria prima ou parte dela a partir da reciclagem ou reaproveitamento de materiais já existentes (WIJEWICKRAMA; CHILESHE; RAMEEZDEEN, 2020).

Os princípios que regem a LR é de basicamente levar a revalorização do produto/material pós-consumo para não aumentar a quantidade de resíduos presentes em aterros sanitários e áreas não adequadas para depósito de resíduos aumentando assim q quantidade de áreas poluídas e degradadas no planeta Terra prejudicando o equilíbrio dos ecossistemas. Desta forma a coleta seletiva atua como uma das principais iniciativas e atividades para a construção do cenário de LR, em suma a coleta seletiva é a forma de segregação dos resíduos gerados pela fonte geradora (empresas, instituições e indivíduos), se faz necessária para que o mesmo tipo de resíduo seja acondicionando de maneira uniforme possibilitando a geração de valor deste material os mais comuns são: plástico, papel, metal e vidro (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2015).

Assim, o descarte correto é fundamental para que o material possa ser reaproveitado novamente para um determinado fim sendo ele a composição de um novo produto da mesma linha ou este material servindo de base para a construção de um outro tipo de produto não associado diretamente ao produto original que este material foi consumido (POKHAREL e MUTHA, 2009).

Desde 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRL) da Lei nº 12.305 define a LR como: “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações”, e estabelece que todas as empresas são responsáveis por seus resíduos gerados em situação de pós-consumo. Alguns produtos são classificados de caráter obrigatório que a implementação da LR seja atuante como: óleos lubrificantes (seguidos de seus resíduos e embalagens), pilhas e baterias, pneus, embalagens de agrotóxicos (obrigatoriamente), lâmpadas (diversos tipos: vapor de mercúrio, fluorescentes e LED) e outros nocivos à saúde humana (PNRL, 2010).

Apesar da implementação das ações indicadas pelo princípio da LR ser considerada onerosa em alguns casos, ela proporciona benefícios para empresas, consumidores e o meio ambiente como:

- Redução de insumos energéticos;
- Redução da extração de recursos naturais;
- Redução da emissão de poluentes;
- Redução do acúmulo de resíduos em aterros sanitários;
- Revalorização de materiais;
- Geração de renda e emprego a partir do tratamento de resíduos.

O tema LR neste trabalho foi relacionado com a ACV como uma alternativa para o tratamento dos resíduos e diminuição da quantidade extração de matéria prima na natureza para a construção de novos transformadores elétricos de potência. Havendo assim a necessidade de buscar na literatura científica documentos relacionados a essas duas temáticas, para tal a seguinte *string* de busca presente no Quadro 8 foi utilizada

Quadro 8 – *String* de busca relacionada a ACV e LR.

("Life Cycle Assessment AND Reverse Logistics AND Model")

A string de busca presente no Quadro 6, foi inserida nas seguintes bases dados; *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science* resultados da quantidade de artigos por bases de dados foi a seguinte:

- *Science Direct*: 33 documentos;
- *Scopus*: 1 documento;
- *Web of Science*: zero documentos.

Assim como nas demais buscas presentes neste trabalho os critérios de inclusão e exclusão dos documentos foram os mesmos descritos no Quadro 4 – Critérios de seleção. Desta maneira o resultado total de documentos acumulados nesta fase de busca para o tema ACV associado a LR foi de 34 documentos, na segunda fase de análise dos documentos encontrados 14 foram aceitos e 20 rejeitados por não apresentarem aderência ao tema pesquisado, a distribuição da quantidade de artigos encontrados por ano é ilustrada na Figura 23.

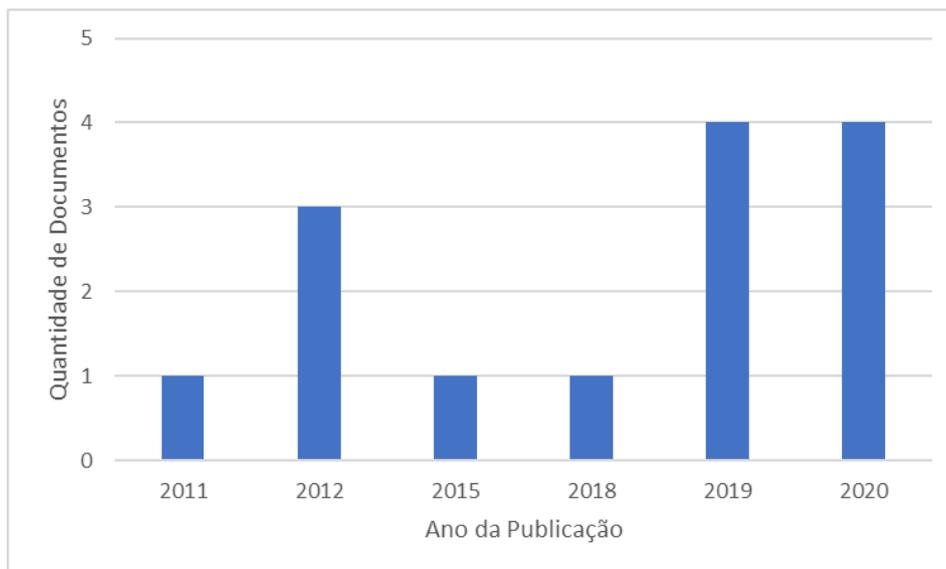


FIGURA 23 - GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS AO LONGO DOS ANOS NO TEMA ACV E LR.

Ao se observar as informações presentes no gráfico da Figura 26, os anos com maior índice de documentos encontrados são 2019 e 2020 com 4 documentos cada, seguido de 2012 com 3 documentos, os anos de 2011, 2015 e 2018 apresentaram apenas uma publicação. A seguir na Figura 24 é apresentada a relação de periódicos/revistas responsáveis pelos 14 documentos.

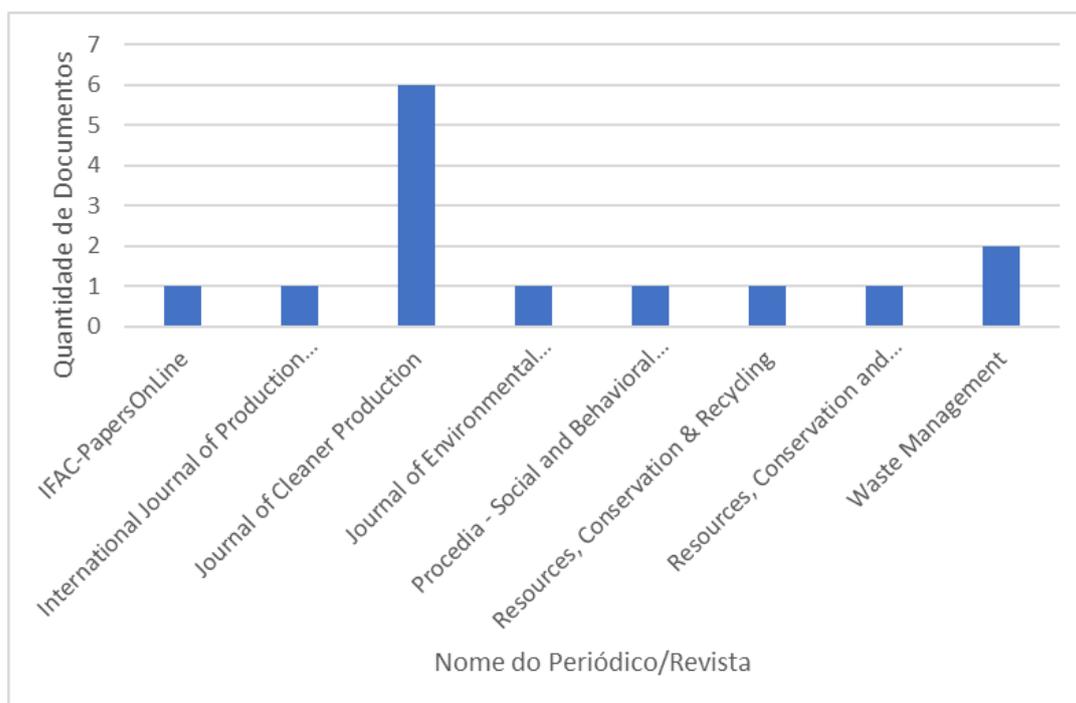


FIGURA 24 - PERIÓDICOS E REVISTAS COM PUBLICAÇÕES SUPERIORES A UM NO TEMA ACVE LR.

O periódico *Journal of Cleaner Production* se destaca com 6 documentos publicados, *Waste Management* e *Resources, Conservation and Recycling* com 2 documentos todos os demais apresentaram apenas uma publicação (*IFAC-PapersOnLine*, *Journal of Environmental Management*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* e *International Journal of Production Economics*). As palavras-chave que mais se repetiram a partir de seu uso nos 14 documentos finais são apresentadas no gráfico de nuvem presente na Figura 25.



FIGURA 25 – GRÁFICO DE NUVEM DE PALAVRAS-CHAVE, PARA ACV E LR.

As principais palavras-chave que se repetiram são: *reverse logistics*, *sustainability*, *recycling*, *remanufacturing* e *waste-managemnte*. O link da relação ACV e LR ao ser pesquisado nas bases de dados, apresentou ser uma relação restrita para o cenário de quantidade de publicações com a interpretação dos dados bibliométricos pode-se concluir que os anos de 2019 e 2020 se destacaram perante aos demais quanto ao número de publicações (total de 4 arquivos em cada ano, os demais anos apresentaram uma variação entre 1 a 3 documentos), o periódico *International Journal of Production* é o periódico que apresentou destaque no volume de publicações (6 documentos no total) todos armazenados entre as bases de dados Science Direct (33 documentos) e Scopus (1 documento).

E as principais informações referentes aos 14 documentos são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – ACV e LR

Título	Autor	Ano	Contribuição
Sustainable reverse logistics optimization with triple bottom line approach: An integration of disassembly line balancing	Budak, Aysenur	2020	Utilização da LR associada com o TBL para construção de um cenário positivo do ponto de vista econômico para empresas do do segmento de REEE.
<i>Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries</i>	Alamerew, Yohannes A. ; Brissaud, Daniel	2020	Apresenta os benefícios da implementação da LR e da transição da economia linear para a economia circular para uma indústria de baterias de veículos elétricos.

<i>Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes</i>	Jaunich, Megan Kramer ; DeCarolis, Joseph ; Handfield, Robert ; Kemahlioglu- Ziya, Eda ; Ranjithan, S. Ranji ; Moheb- Alizadeh, Hadi	2020	Apresenta a importância da coleta seletiva como apoio para LR e que o reaproveitamento dos resíduos de REEE é vantajoso do ponto de vista ambiental e econômico.
<i>Reverse logistics system analysis of a Brazilian beverage company: An exploratory study</i>	Beiler, Bruno Caride ; Ignácio, Paulo Sargio de Arruda ; Pacagnella Júnior, Antônio Carlos ; Anholon, Rosley ; Rampasso, Izabela Simon	2020	Apresenta uma análise e os benefícios sobre a LR em uma empresa de bebidas no Brasil.
<i>Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics</i>	Prajapati, Himanshu ; Kant, Ravi ; Shankar, Ravi	2019	Revisão sistemática da literatura sobre o tema LR, apresentando os principais aspectos discutidos no tema como: sustentabilidade, economia e sociedade.
<i>How manage waste from End-of-Life Vehicles? - method proposal</i>	Kosacka-Olejnik, M.	2019	Apresentam uma proposta de gerenciamento dos resíduos após o fim do ciclo de vida de veículos.
<i>Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders</i>	Rebehy, Perla Calil Pongeluppe Wadhy ; Andrade dos Santos Lima, Sabrina ; Novi, Juliana Chiaretti ; Salgado, Alexandre Pereira	2019	Apresenta a viabilidade técnica de implementação de sistemas de LR comparando-se com a PNRS no Brasil.
<i>End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review</i>	Mahmoudi, S. ; Huda, N. ; Alavi, Z. ; Islam, M.T. ; Behnia, M.	2019	Revisão sistemática quantitativa de literatura a respeito do fim do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos.
<i>Understanding approaches to complexity and uncertainty in closed-loop supply chain management: Past findings and future directions</i>	Coenen, Jannie ; van der Heijden, Rob E.C.M. ; van Riel, Allard C.R.	2018	Apresenta os desafios das cadeias de suprimentos em circuito fechado par uma transição de ascensão econômica e ambiental.
<i>Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement</i>	Ferri, Giovane Lopes ; Diniz Chaves, Gisele de Lorena ; Ribeiro, Glaydston Mattos	2015	Desafios da implementação da LR para os resíduos sólidos urbanos no Brasil.
<i>Internal cycle modeling and environmental assessment of multiple cycle consumer products</i>	Tsiliyannis, C.A.	2012	Apresenta análise de avaliação do ciclo de produtos com materiais reciclados e não reciclados.
<i>Drivers of Reverse Logistics Activities: An Empirical Investigation</i>	M.Şükrü Akdoğan; Ayşen Coşkun	2012	Apresenta a perspectiva da LR para uma empresa de eletrodomésticos na Turquia.

<i>Production planning of a hybrid manufacturing & "remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain"</i>	Kenné, Jean-Pierre ; Dejax, Pierre ; Gharbi, Ali	2012	Apresenta os benefícios do planejamento da produção híbrida com a comercialização de produtos remanufaturados.
<i>A study of reverse logistics flow management in vehicle battery industries in the midwest of the state of São Paulo (Brazil)</i>	Hojas Baenas, Jovita Mercedes ; de Castro, Rosani ; Gomes Battistelle, Rosane Aparecida ; Gobbo Junior, José Alcides	2011	Apresenta o desenvolvimento de uma estrutura de LR para empresas de pequeno e médio porte de baterias (para veículos) no interior do Estado de São Paulo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para BUDAK (2020), a LR e o TBL estão diretamente relacionados e juntos podem ser trabalhados para positivos retornos financeiros para a organizações e comunidades quem implementem as técnicas da LR. Afirmando que a construção de uma rede de LR é apontada com uma ótima solução para o amplo uso da LR por consumidores e empresas, indicando também que os equipamentos classificados como REEE apresentam a técnica de desmontagem como início do processo de LR um dos pontos mais importantes para que os materiais destes equipamentos possam ser aproveitados da melhor forma.

O resíduo de REEE principalmente produtos como celulares, computadores, *tablets*, dentre outros é considerado um dos mais valiosos sob a ótica do potencial de aproveitamento dos seus materiais e do seu valor de mercado por se tratar de uma matéria prima nobre, a instalação de sistemas de LR e coleta seletiva para estes tipos de materiais contribuem para a diminuição do consumo de eletricidade empregado no beneficiamento dessas matérias primas, no entanto algumas ações após separação do material como a trituração dos materiais facilitam a reinserção deste material nas cadeias produtivas novamente (JAUNICH *et al.*, 2020).

Outro segmento de produção dos resíduos de REEE é o de baterias elétricas destinadas a veículos, seus resíduos são de extremamente danosos ao meio ambiente, tal segmento vive uma transferência de tecnologia dada a pressão ambiental por veículos com menor emissão de poluentes seja na sua cadeia produtiva e pelo uso dos veículos. Desta forma o segmento vem ampliando a produção de veículos elétricos e traçando estratégias de transição

do modelo de produção linear para o modelo de economia linear também barra suas baterias e esta transição de recuperação das baterias por meio da LR apresentam um enorme potencial de valorização dos veículos e baterias no mercado quando recuperados diminuindo sua carga de emissão dos poluentes (YOHANNES E BRISSAUD, 2020).

Além do setor de resíduos de REEE, outros setores também trabalham na implementação da LR e ACV pois todos ao final do processo de pós-venda e pós-consumo apresentam resíduos e na maioria dos casos estes resíduos como embalagens plásticas, papel, vidro e alumínio são possíveis de se reciclar e também são interessantes para o mercado manufatureiro obtendo ganhos ambientais interessantes para as cadeias produtivas (BEILER et al., 2020).

2.7 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os transformadores são máquinas elétricas que trabalham dentro do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, e tem como função garantir o equilíbrio do fornecimento de energia elétrica (CANO-GONZÁLEZ et al., 2017).

Os transformadores são classificados como monofásicos ou trifásicos, de modo que a classificação está relacionada às características construtivas de enrolamento, capacidade de potência de aplicação, regime de trabalho e sua função dentro do sistema em que se encontra instalado (CANO-GONZÁLEZ et al., 2017).

Os transformadores podem ter dois ou mais enrolamentos dentro de um fluxo magnético, em que fluxo magnético é mantido em confinamento no núcleo, de modo que quando aplicada uma dada tensão elétrica com variação no tempo, o fluxo magnético percorre o núcleo do transformador (WINDERS, 2002).

O movimento concatenado do fluxo magnético, conhecido como Força Eletromotriz (FEM) tem sua amplitude dependente do número de espiras do enrolamento primário (WINDERS, 2002).

O transformador de potência é um equipamento elétrico utilizado em todo o mundo, sendo considerado uma das máquinas elétricas mais eficientes com relação ao seu desempenho. É uma máquina elétrica que apresenta diversos tipos de perdas em seu funcionamento, sejam por razões físicas de operação, ou pelas propriedades físicas, elétricas e químicas de cada material que o compõe.

O princípio de funcionamento destes equipamentos está estruturado na força eletromagnética, em que de maneira convencional é constituído de duas bobinas (enrolamentos), que podem ser de cobre ou alumínio, enroladas em torno do núcleo do transformador, composto por um material ferromagnético (SEKARAN, 2016).

As bobinas não possuem uma conexão direta entre elas, em que a conexão ocorre por meio do fluxo magnético gerado, quando a bobina do enrolamento primário recebe uma excitação na rede elétrica em regime de corrente alternada (CA), e que o fluxo magnético que flui até o enrolamento da bobina do enrolamento secundário, que estará acoplado a carga final do circuito (SEKARAN, 2016).

A Figura 26 exemplifica o comportamento do fluxo magnético entre as bobinas e o núcleo do transformador.

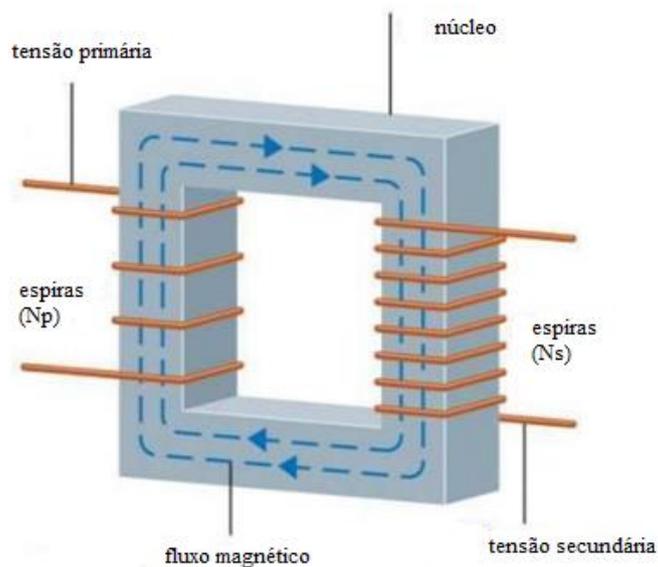


FIGURA 26 – COMPORTAMENTO DO FLUXO MAGNÉTICO NO TRANSFORMADOR. FONTE: ALCÂNTARA (2012).

As Tabelas 13 e 14 mostram os principais tipos de transformadores, seguidos de suas características de funcionamento e os principais tipos de perdas (DEL VECCHIO *et al.*, 2010).

Tabela 13 - Principais Tipos de Transformadores de Potência

Tipo de Transformador	Características de Funcionamento
Transformador com comutação de taps.	Controlam a tensão secundária do transformador, mediante o monitoramento dos níveis de tensão elétrica de entrada.
Transformador regulador de módulo de tensão.	Sua principal função é corrigir distúrbios de tensão elétrica, atuando para estabilizar o controle da rede de energia elétrica.
Transformador regulador de fase de tensão (ou defasador).	Atua em uma fase específica da linha de transmissão de energia elétrica com função de promover a defasagem entre as fases de energia.
Transformadores elevadores.	Elevam os níveis de tensão elétrica produzidas por geradores de energia elétrica.
Transformadores de transmissão.	Utilizados para interligar subestações de energia elétrica, com diferentes tipos níveis de tensão elétrica.

Transformadores de subtransmissão.	São responsáveis por reduzir os níveis de tensão de linhas de transmissão de energia elétrica.
Transformadores de distribuição.	São transformadores de pequeno porte, com a função de baixar a tensão elétrica ao nível do consumidor final.

Fonte: (Adaptado de DEL VECCHIO *et al.*, 2010 e ABNT NBR 5356-1, 2007).

Tabela 14 - Principais Tipos de Perdas nos transformadores

Tipo da Perda	Características
Por fluxo de dispersão.	Geram indutância nas bobinas e provocam uma reatância indutiva em série nos enrolamentos.
Por histerese.	Parte da energia do transformador é consumida para que os períodos magnéticos possam ser alinhados.
Por correntes de Foucault.	Correntes que circulam na parte interna do núcleo do transformador, geram perdas por efeito Joule.
No cobre.	Provenientes do efeito Joule, que se ocasiona nos condutores elétricos que formam as bobinas.

Fonte: (Adaptado de DEL VECCHIO *et al.*, 2010 e ABNT NBR 5356-1, 2007).

O projeto de cada transformador é feito para que tenha uma operação robusta e um ciclo de funcionamento de aproximadamente 70 anos. Todos os projetos de transformadores elétricos de potência devem seguir o conjunto de especificações indicados pelas seguintes Normas:

- **NBR 5370:1990** - Conectores de cobre para condutores elétricos em sistemas de potência – Especificação;
- **NBR 5380:1993** - Transformador de potência – Método de ensaio
- **NBR 5405:1983** - Materiais isolantes sólidos – Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial - Método de ensaio;

- **NBR 5437:1984** - Bucha para transformadores sem conservador de óleo
- Tensão nominal 1,3 kV - 160 A, 400 A e 800 A - Dimensões – Padronização;
- **NBR 5458:1986** - Transformador de potência – Terminologia;
- **NBR 5906:1984** - Chapas finas a quente de aço carbono para estampagem – Especificação;
- **NBR 5915:1984** - Chapas finas a frio de aço carbono para estampagem – Especificação;
- Dentre outras.

As Figuras 27 e 28 apresentam a estrutura básica de um transformador de potência e a sua parte ativa, ilustrando seus principais componentes (*Pauwels Group*, 2018), que são descritos na sequência.

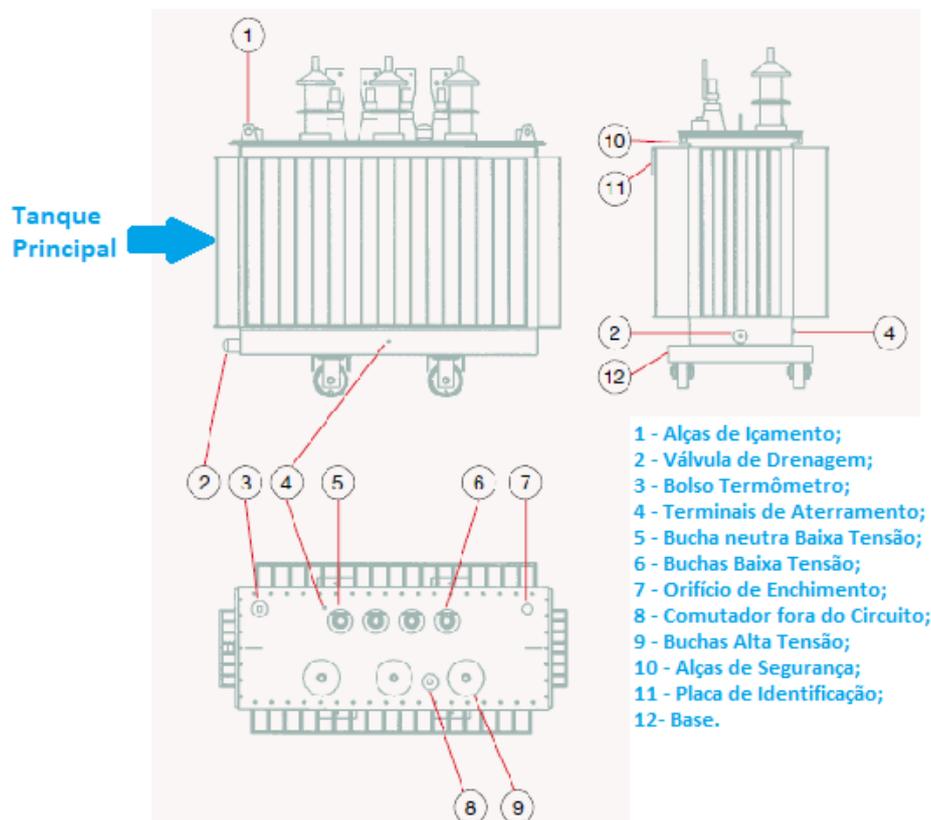


Figura 27 – Transformador de Potência genérico (Adaptado: Pauwels Group, 2018).

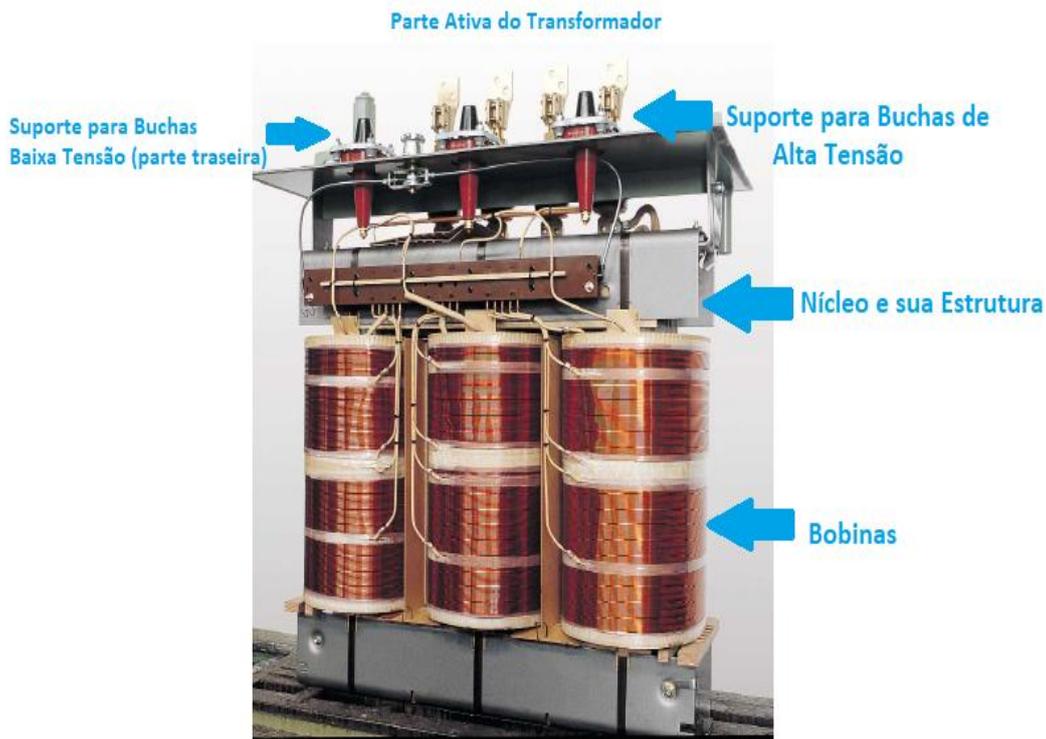


Figura 28 – Parte Ativa do Transformador de Potência genérico (Adptado Pauwels Group, 2018).

Núcleo: é o elemento que direciona e facilita a passagem do fluxo magnético entre as bobinas. É formado por um conjunto de lâminas metálicas (compostas por Ferro - Fe, Silício – Si (semi-metal), Níquel - Ni ou de ligas de Cobre - Co), e sua montagem é feita para abrigar as bobinas na faixa central de sua estrutura.

Bobinas: são os condutores elétricos, normalmente de Cu ou Al, enrolados ao entorno da região central do núcleo do transformador.

O número de espiras de cada bobina, assim como o seu isolamento é intrínseco a cada tipo de transformador, de acordo com a potência, tensão e corrente nominal. O enrolamento das bobinas pode ser feito em forma de disco, helicoidais ou em camadas.

Isolamento: o isolamento do transformador é fundamental para o seu funcionamento, assim como para a sua eficiência operacional. Normalmente, o isolamento é feito por óleo isolante presente no tanque do transformador, empregado também para promover o resfriamento do núcleo e das bobinas.

Além disso, o isolamento utiliza ainda papel isolante que é envolve as bobinas do transformador;

Buchas: são compostas por material cerâmico (porcelana), e têm a função de promover o fluxo da transmissão de energia elétrica na entrada e na saída dos transformadores, por meio de um condutor no interior da bucha.

As buchas são divididas em 3 tipos, de acordo com o seu isolamento interno, de acordo com o seu tipo construtivo e, por último, de acordo com o meio de isolamento dos terminais;

Tanque: é a parte do transformador em que o óleo isolante é armazenado.

3.MÉTODO DE PESQUISA

A estrutura procedimental do método de pesquisa é ilustrada na Figura 29, tendo como base dois pilares: o método propriamente dito e a coleta de dados.

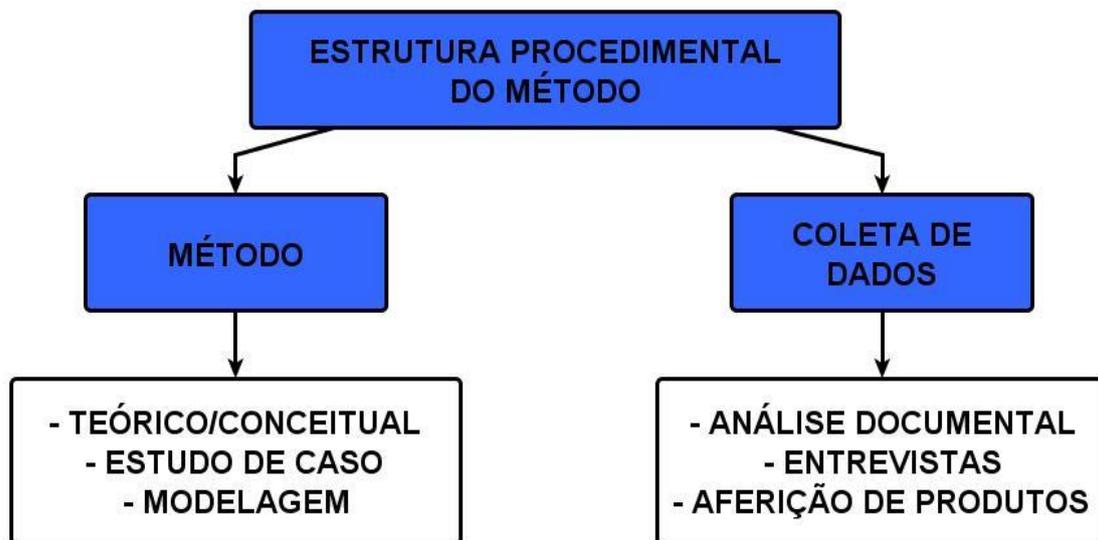


FIGURA 29 – ESTRUTURA PROCEDIMENTAL DO MÉTODO.

No que diz respeito ao método, suas definições foram apresentadas em 1.5 e os pontos conceituais estão descritos na Figura 28, e conta com abordagem quantitativa, com objetivos em caráter exploratório, e método teórico/conceitual por trabalhar na construção de um modelo de ACV acrescido do uso da LR, tendo como procedimento inicial analisar e interpretar as Normas ABNT/ISO 14040 e 14044, integrando-as com o conceito da LR para determinar os blocos de composição do modelo proposto. O modelo deve também estabelecer os encaminhamentos e cenários do descarte adequado dos materiais em situação de pós consumo, visando diminuir os potenciais impactos ambientais. A coleta de dados será por meio de análise documental, entrevistas e aferição de produtos.

O método de Estudo de Caso se aplica para coletar dados das etapas de beneficiamento da matéria prima e pós-consumo para os dois tipos de transformadores elétricos de potência em estudo: 10kVA e 30kVA. Esses dados,

posteriormente, servirão como parte das informações necessárias para a construção do modelo conceitual (modelagem), que deverá quantificar os potenciais impactos ambientais do produto para cada cenário de LR estabelecido. A razão do Estudo de Caso reside em atender a uma demanda existente por transformar processos manufatureiros já existentes, que operam no conceito de economia linear, em um viés ambientalmente viável para meio ambiente, sociedade e indústria, dentro do conceito de economia circular.

No pilar “Coleta de Dados”, para a pesquisa bibliográfica apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, foram coletadas informações em bases de dados distintas: *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science* (dados internacionais especializadas em trabalhos técnicos e práticos no cenário global da ciência) para a composição dos fundamentos, da conceituação teórica e dos dados secundários do presente estudo, bem como do estado da arte sobre o tema divididos nas seguintes divisões: consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo; sustentabilidade e desenvolvimento sustentável; ACV e suas aplicações; e *softwares* de simulação computacional.

Já a análise documental (composta pela coleta de informações em relatórios técnicos, em bancos de dados e inventário da empresa parceira da pesquisa e de domínio público), deve ser realizada para a coleta de informações sobre o desenvolvimento e a execução dos processos e atividades ligadas à manufatura, reforma e LR dos transformadores elétricos de potência, a fim de identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental do produto. Parte dessa coleta deve ser realizada *in loco*, como parte dos Estudos de Caso. Também devem ocorrer, nos Estudos de Caso, entrevistas não estruturadas com os *stakeholders* responsáveis pelos processos para identificar dados específicos não descritos nos documentos; essas entrevistas podem ser realizadas em paralelo à análise documental e com o processo de mapeamento dos processos, com o intuito de minimizar dúvidas sobre a condução das atividades e conhecer todas as particularidades das atividades desenvolvidas pela empresa.

A aferição dos produtos é necessária para estratificar cada um dos componentes e peças existentes no produto que, posteriormente, terão seus dados imputados na construção do ICV e modelagem computacional.

Toda a condução dos elementos descritos nessa estrutura procedimental do método é necessária para formulação do modelo proposto neste trabalho fazendo uso da ACV acrescida do uso da LR para os transformadores elétricos de potência de maneira fidedigna com a realidade de utilização deste tipo de produto no cenário nacional.

3.1 OS ESTUDOS DE CASO

Por definição, o **Estudo de Caso** é classificado como sendo de natureza empírica e é responsável por investigar um dado (determinado) evento ou fenômeno em sua maioria das vezes pouco estudado em sua aplicação direta, com foco no desenvolvimento de pesquisa e trabalhos reais em profundidade do ponto de vista da sua análise podendo ser de um ou mais casos (objetos) para completeza de seu detalhamento (em alguns casos situações de um cotidiano) (BERTO e NAKANO, 2000).

Os estudos de caso também evitam a generalização de dados plenamente oriundos da literatura, pois a realização de visitas *in loco*, a análise documental, as entrevistas não estruturadas e estruturadas permitem a captação de dados com maior grau de veracidade e de acordo com a realidade do problema de pesquisa analisado. Torna a coleta de dados mais rica por conter diversas fontes de dados para composição de seu cenário de análise, validando-se também com os dados presentes na literatura e proporcionando maior interação dos dados principalmente no caso de construção de modelos (MIGUEL, 2007).

Desta maneira a estruturação dos estudos de caso deste trabalho seguem os procedimentos previstos por YIN (2001) e MIGUEL (2007); estes procedimentos norteiam a construção do protocolo de execução da presente pesquisa e devem ser planejados com base em uma análise aprofundada do problema de pesquisa e conduzidos pelas seguintes etapas: definição da estrutura conceitual teórica (capítulo 2), planejamento dos dados (capítulo 3), condução do teste piloto (capítulo 4), coleta de dados (capítulo 5), análise dos dados e relatório (capítulo 5) (fluxograma ilustrado na Figura 30).

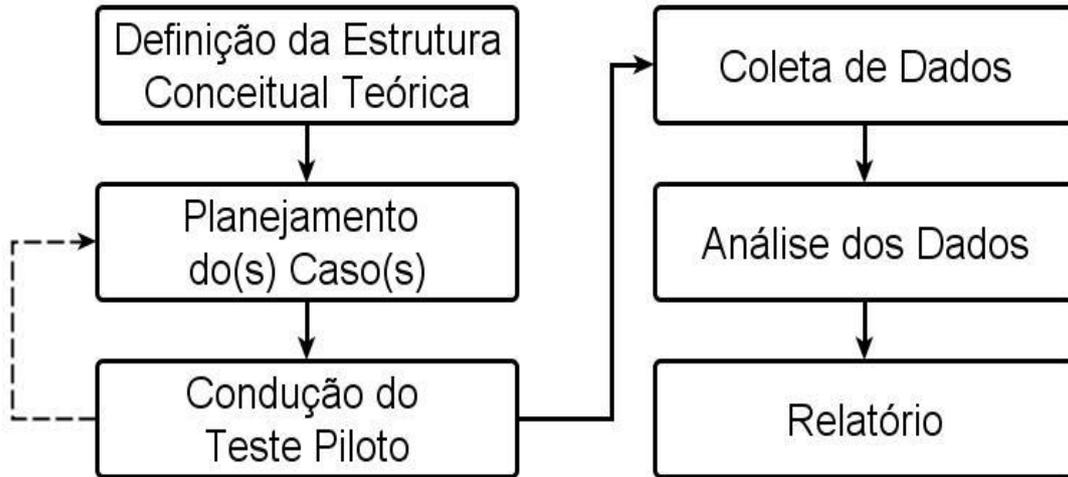


FIGURA 30 – ESTRUTURAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS (MIGUEL, 2007).

Os estudos de caso abordarão a coleta de dados de duas empresas da iniciativa privada: a primeira, ligada à atividade de **produção** dos transformadores elétricos de potência, é uma empresa multinacional do setor eletroeletrônico instalada no interior do Estado de São Paulo; é responsável por projetar, fabricar e comercializar centenas de unidades de transformadores elétricos de potência (com uma vasta gama de tipos) a serem utilizados tanto por concessionárias de energia elétrica quanto por empresas que necessitem do equipamento para aplicações específicas.

A outra empresa, é ligada à atividade de **remanufatura e reaproveitamento** dos transformadores, classificada aqui como uma empresa receptora dos transformadores de potência pós consumo. Trata-se de uma empresa brasileira, com sede administrativa localizada no interior do Estado de São Paulo e com operações no interior do Estado do Rio de Janeiro, especializada em Engenharia Reversa (ER) e meio ambiente, que recolhe e desmonta mensalmente em torno de 3000 transformadores por mês.

A coleta e quantificação dos dados deve contar ainda com informações presentes na literatura com a finalidade de propor um modelo teórico conceitual direcionado ao transformador elétrico de potência utilizando a ACV acrescido do uso dos conceitos da LR.

3.2 MÉTODO DE ACV

O método de ACV empregado neste trabalho refere-se ao conjunto de regras definido pelas Normas ABNT/ISO 14040 (Princípios e Estrutura) e 14044 (Requisitos e Orientações), que se trata de instrumentos universalmente aceitos na comunidade acadêmica e industrial, capazes de auxiliar na mensuração dos potenciais impactos ambientais, considerando dados de consumo de recursos naturais empregados no processo de manufatura de produtos. As etapas de aplicação da ferramenta estão apresentadas na Figura 13 (definição da ACV) e são explicadas na sequência do texto.

3.2.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

A ferramenta de ACV apresenta como primeira etapa a definição do objetivo que se pretende alcançar com o uso dessa análise e do escopo da avaliação a ser realizada.

O propósito deste trabalho consiste em avaliar os potenciais impactos ambientais relacionados à manufatura de transformadores de potência, seu uso e a disposição final de seus componentes, bem como em quantificar a redução dos impactos ambientais quando as peças dos transformadores são reinseridas na cadeia produtiva para outros produtos e/ou principalmente quando efetuado o processo de reforma e remanufatura dos transformadores de potência acrescido do uso da LR. Tem como escopo a análise dos cenários estabelecidos a partir das diferentes estratégias de LR e dos 9Rs para a reinserção das peças e componentes já beneficiados novamente na cadeia produtiva.

3.2.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

O segundo momento da ferramenta ACV é a realização do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), utilizado para a realização do balanço de massa e de energia do

“berço ao túmulo” do produto em análise. O ICV considerará, então, a quantidade de massa e energia envolvidas na produção dos transformadores elétricos de potência.

Trata-se de coletar, *in loco*, informações sobre a composição do ICV do transformador, que é desmontado e suas peças separadas e pesadas, levando em consideração o fluxograma proposto para composição do ICV presente na Norma ABNT/ISO 14044 (2014), apresentado na Figura 31.

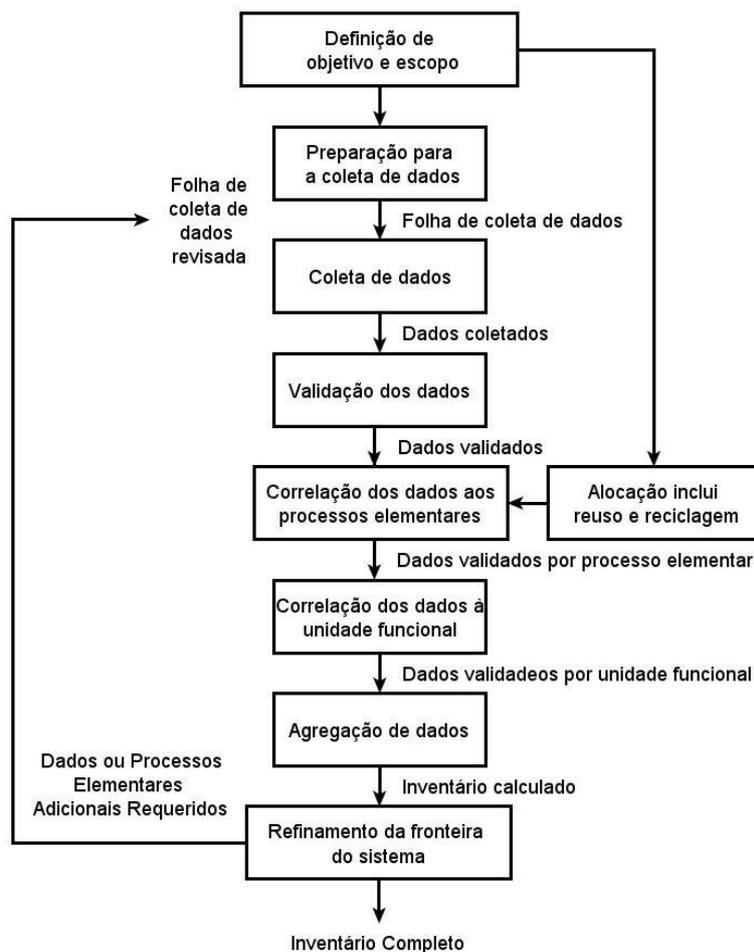


FIGURA 31 - FLUXO DO PROCEDIMENTO DE MONTAGEM DO ICV (ABNT/ISO 14044-2014).

Como resultado do ICV será obtida uma planilha com os dados quantitativos de massa para cada uma das peças e componentes, materiais de composição e consumo de eletricidade.

O procedimento de montagem do ICV auxilia não só na coleta dos dados como também na construção do refinamento dos seguintes aspectos: definição do objetivo e escopo, determinação dos fluxos do produto, fronteira do sistema, abordagem para construção do inventário do ciclo de vida, construção do ICV, dentre outros elementos até o cálculo dos potenciais impactos ambientais e finalização da ACV apresentados a seguir.

A abordagem utilizada para a construção do inventário do ciclo de vida será atribucional, em que há uma análise estática dos impactos gerados na cadeia de produção.

Portanto, não serão avaliadas variações econômicas ou de outra natureza que alterariam a geração de emissões causadoras de impactos; os cenários estáticos serão a manufatura e uso do transformador de potência, associando o fim do seu ciclo de vida com o reuso dos materiais (os empregando na cadeia produtiva) e a disposição final dos componentes sem possibilidade de reuso.

3.2.3 USO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

A terceira etapa definida pela ferramenta de ACV estabelece que os impactos ambientais identificados na fase de ICV devem ser analisados e avaliados sob as perspectivas presentes no Método *Recipe I* (2014) de ACV a fim de que haja uma interpretação desses resultados e que respostas aos potenciais impactos ambientais e procedimentos mitigatórios possam ser apresentados.

A análise e avaliação do impacto deve utilizar, de preferência, o recurso da modelagem computacional, correlacionando os dados de ICV por categorias de potenciais de impacto ambiental, e modelando-os dentro das potenciais categorias de impacto ambiental selecionadas para este estudo: mudanças climáticas, toxicidade humana, radiação ionizante, depleção do ozônio, acidificação terrestre e depleção da água.

Para o presente trabalho, será utilizado o *software SimaPro*, uma ferramenta de simulação computacional desenvolvida pela comunidade europeia e difundido

em mais de 80 países, que é capaz de integrar os dados de inventário de um insumo e produto, combinando os resultados inseridos com os das bases de dados disponíveis (*SimaPro*, 2018).

Essa ferramenta permitirá efetuar os cálculos de entrada e saída do objeto de estudo, pertinentes à análise do ICV proporcionando um relatório de categorias de impacto ambientais, que auxiliará na composição da ACV (*SimaPro*, 2018).

3.2.4 INTERPRETAÇÃO

Ainda de acordo com o que estabelece a ferramenta ACV, após a análise e avaliação dos resultados do ICV, é preciso realizar uma etapa de interpretação desses resultados e das análises e avaliações. Essa fase tem como objetivo compreender todos os resultados de cada um dos cenários de simulação propostos no escopo, de maneira transparente e com base nas delimitações propostas na especificação do estudo, considerando as potenciais categorias de impacto ambiental indicadas para este estudo expressando o perfil ambiental para o caso dos transformadores elétricos de potência.

A partir dos fundamentos de interpretação do ciclo de vida descritos ABNT/ISO 14043 (2005), são apresentadas a seguir as principais características que a interpretação dos dados do presente estudo de ACV acrescido do uso da LR deverá ter:

- ✚ Deve utilizar um procedimento sistemático para: identificação, qualificação e verificação dos resultados da análise do ICV;
- ✚ Deve utilizar um procedimento interativo para todas as fases da ACV que serão realizadas;
- ✚ Deve estabelecer a relação entre as técnicas de gestão ambiental já existentes e a ACV, destacando seus pontos em comum e de complemento para construção do perfil ambiental do processo ou produto em análise (neste caso os transformadores elétricos de potência).

3.2.5 FRONTEIRAS DO SISTEMA

Como fronteiras do sistema, devem ser consideradas as etapas de extração dos recursos naturais, de beneficiamento da matéria prima, e de manufatura da matéria prima, bem como o consumo de eletricidade associado às etapas de produção do transformador; a razão para a definição desses limites se justifica por especificar quais etapas serão consideradas para a ACV e que, posteriormente, possam ser otimizadas quando possível.

Para os subprodutos e resíduos gerados durante as etapas consideradas, será priorizada a estratégia de reuso e/ou reinserção desses materiais no ciclo de vida do transformador, conforme o princípio dos 9Rs. Quando isso não for possível, a estratégia de disposição final será considerada.

3.2.6 LIMITE GEOGRÁFICO, TEMPORAL E TECNOLÓGICO

O escopo geográfico limita-se às empresas da iniciativa privada que produzem os transformadores elétricos de potência e que os comercializam para as companhias/concessionárias de energia elétrica (EE) no território nacional brasileiro, que por sua vez são as responsáveis por realizar a geração, transmissão e distribuição de eletricidade para os consumidores.

Sob o aspecto temporal, o trabalho inclui transformadores que foram utilizados nos últimos 35 anos (tempo que se caracteriza por ser o tempo médio de utilização dos transformadores de potência pelas companhias de EE).

Quanto ao escopo tecnológico foram considerados os processos de manufatura atualmente existentes, dentro do conceito de economia linear, para a execução das atividades do berço ao túmulo desse estudo.

3.2.7 FLUXO DE REFERÊNCIA, FUNÇÃO DO SISTEMA E UNIDADE FUNCIONAL

Para o fluxo de referência serão considerados os fluxos de uma unidade do transformador elétrico de potência de 10kVA e uma unidade do transformador de potência de 30kVA; cada tipo de potência é responsável por atuar em um determinado range de tensão elétrica na rede de distribuição de eletricidade, e são estes os transformadores mais utilizados na rede.

A função primária destas unidades consiste em abaixar a tensão (V) presente na rede de distribuição de EE e em seguida a fornecer aos consumidores de baixa tensão (modalidade residencial), da rede elétrica do território nacional. E a função secundária do sistema é garantir o fornecimento de eletricidade aos consumidores com qualidade, de maneira estável e segura dentro dos parâmetros estabelecidos pela ANEEL.

Já as unidades funcionais consideradas para a ACV serão as mesmas do Fluxo de Referência por serem equipamentos com portes distintos, mas considerando intrinsecamente a produção e reutilização dos seguintes materiais: cobre, silício, aço, alumínio e papel.

3.2.8 SISTEMA DO PRODUTO

O sistema de produto se faz necessário para especificar quais serão as unidades de medidas utilizadas em cada uma das unidades de processo facilitando assim a identificação dos dados de entrada e saída para cada uma das etapas presentes neste estudo de ACV acrescido do uso da LR.

A composição do sistema de produto para este estudo se reflete nas atividades do berço ao túmulo constituintes do transformador elétrico de potência, as atividades são ilustradas no fluxograma presente na Figura 32:

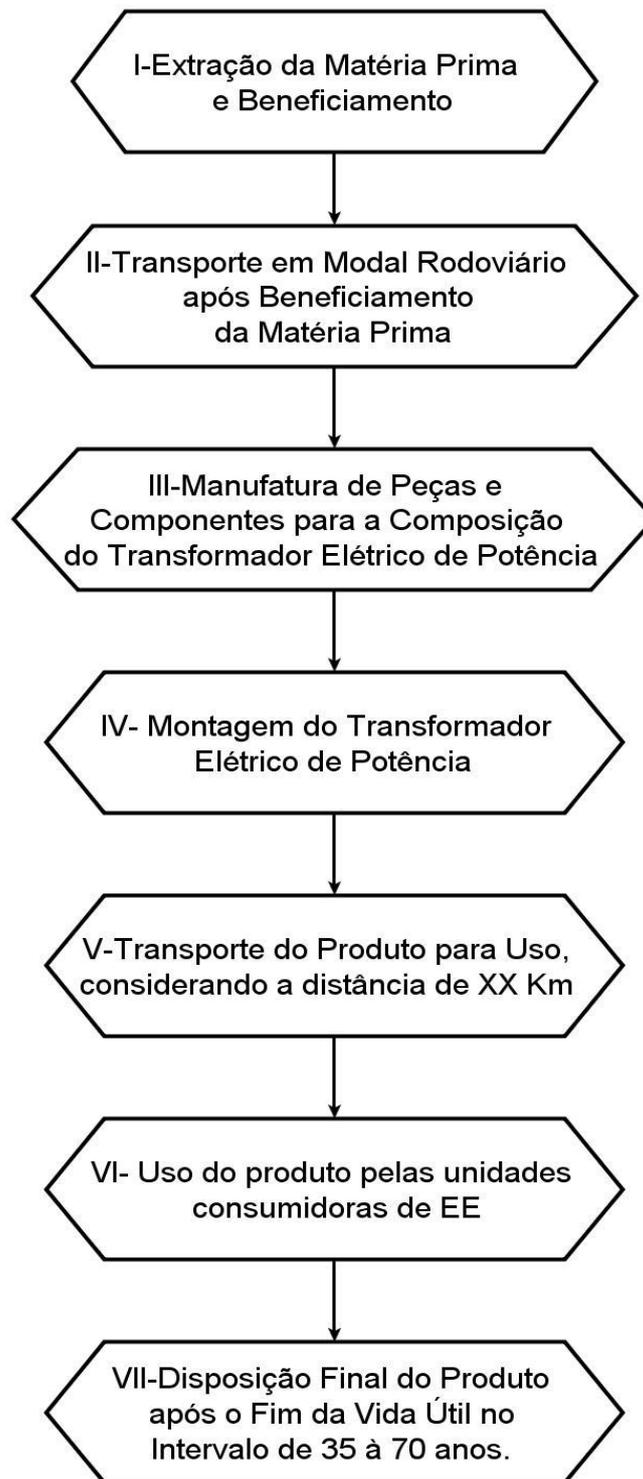


FIGURA 32 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PRODUTO.

3.2.9 – COLETA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

A coleta e organização dos dados deverá contemplar os seguintes pontos do processo: entrada, fluxo de processo e saída. Para tanto, espera-se que um conjunto de definições prévias ocorram:

- Elaboração de uma lista de unidades de medida dos dados de interesse;
- Definição da forma de coleta dos dados de interesse.

Essas ações irão resultar na construção do ICV utilizado na modelagem computacional necessária para avaliação ambiental do objeto de estudo e quantificação dos potenciais impactos ambientais. Posteriormente, as ações servirão como base para a aplicação de medidas mitigatórias de recuperação do solo, água e ar.

3.2.10 ESTRUTURA DE MONTAGEM DA LOGÍSTICA REVERSA

Uma vez que a maior contribuição deste trabalho está na adoção de estratégias da LR na ferramenta de ACV, é preciso estabelecer como esse procedimento deve ser considerado nessa composição.

A estruturação dos cenários, considerando as estratégias da LR para peças e componentes deste trabalho em sua coleta de dados, deve ser executada de maneira sistemática de acordo com os seguintes procedimentos:

- Definição de objetivos e componentes do Sistema Logístico Reverso (SLR);
- Estabelecimento das ações de coleta e de acondicionamento dos equipamentos pós-consumo;
- Quantificação dos equipamentos/componentes pós consumo;
- Estruturação de ações de disposição final dos resíduos em locais adequados;

- Indicação de ações para reciclagem de peças e componentes;
- Indicação ações para reinserção (reaproveitamento) das peças e componentes em bom estado pós consumo para remanufatura;
- Testagem de cenários de logística reversa e dos impactos ambientais.

A síntese das atividades para a elaboração do modelo a ser proposto, considerando as etapas de composição da ACV com a LR, é apresentada no fluxograma da Figura 33 (nas caixas pequenas estão indicadas as subseções deste capítulo em que cada etapa é discutida).

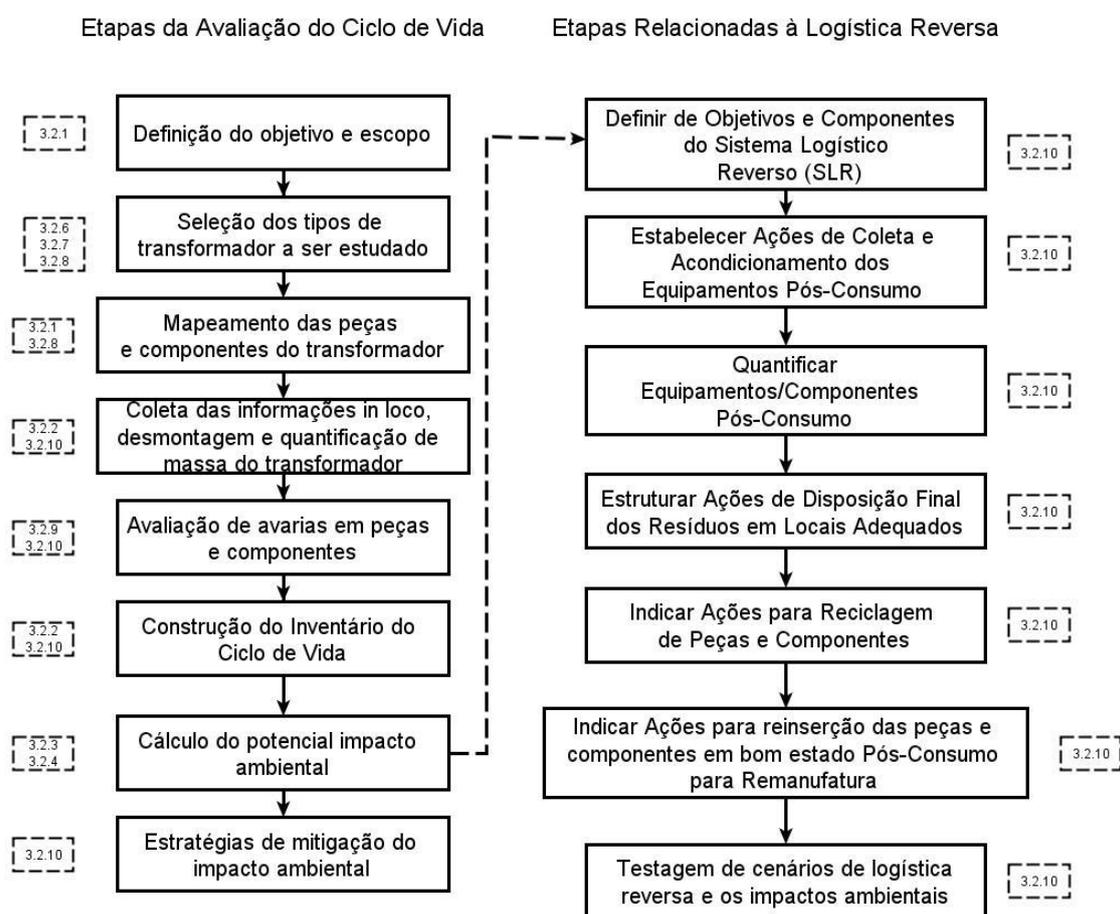


FIGURA 33– SÍNTESE DAS ATIVIDADES PARA ELABORAÇÃO DO MODELO.

A Figura 33, apresenta, em seus blocos presentes na coluna da esquerda, o pior cenário da ACV, em que nenhum dos materiais e processos consideram a

reutilização e reinserção dos materiais existentes em situação de pós consumo ou seja, refere-se ao fluxo presente na economia linear (para manufatura de produtos). Já a coluna localizada à direita da figura ilustra como a LR tende a atuar contribuindo para manufatura de produtos voltados ao contexto da economia circular.

4. PROPOSTA DE MODELO

Neste capítulo é apresentada a proposta de modelo de aplicação da ACV a partir do uso da LR, conforme apresentado na Figura 33, visando reduzir os impactos no uso de insumos de manufatura: caso dos transformadores elétricos de potência. Elenca as características para a construção do modelo de ACV para os transformadores elétricos de potência e para a proposta do modelo genérico.

4.1 CARACTERÍSTICAS PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE ACV PARA OS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Dentro do escopo da ACV, a construção de um modelo de avaliação, seja ele orientado ao produto ou ao processo como citado anteriormente, trabalha contabilizando as entradas de insumos e de recursos, os resultados do produto ou do processo, e os resíduos e as emissões gerados, como apresentado na Figura 34 (YANG et al, 2017 e CHIAVENATO, 2011).

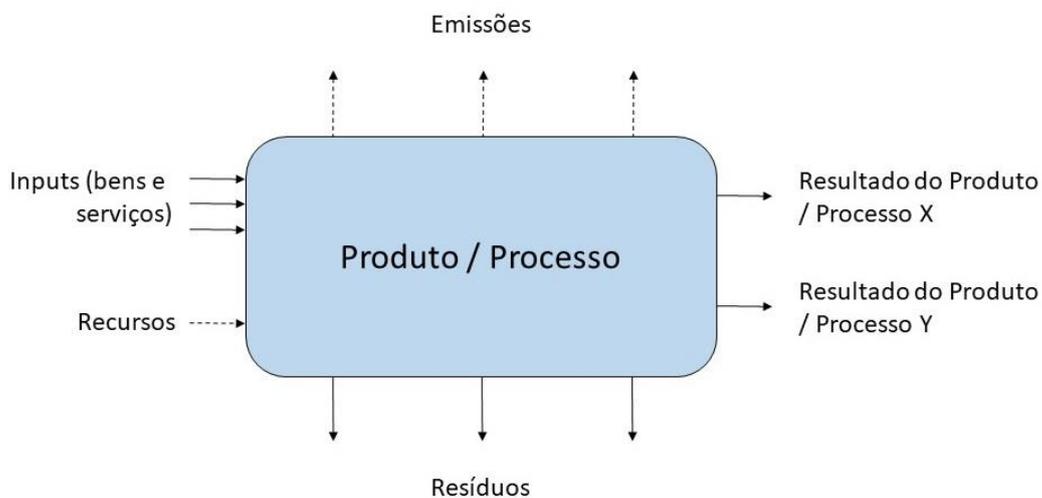


FIGURA 34 – ESTRUTURA GERAL DE CONCEPÇÃO GERAL PARA PRODUTO OU PROCESSO. ADAPTADO (YANG ET AL, 2017 E CHIAVENATO, 2011).

Desta forma, as características de cada produto ou processo se expressam: pelo tipo de entrada de recursos, de insumos e de matérias primas que são inseridos na fase inicial de transformação do objeto em questão; pelas atividades de transformação necessárias para a obtenção do produto ou processo em questão;

pelas saídas deste produto ou processo; e pelos tipos de resíduos (sólido, líquido ou gasoso) gerados por essa transformação, seguido de sua quantidade e as emissões (incluindo aqui a descrição de cada uma das substâncias emitidas) (CHIAVENATO, 2011).

Para o transformador elétrico de potência, o levantamento de todas essas informações será feito dentro da coleta de dados, realizada durante a etapa de ICV.

4.2 FLUXO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.

Para construção de um modelo de ACV para qualquer produto é necessário entender como funciona, em linhas gerais, seu processo de desenvolvimento (BUCHERT et al, 2015).

Todo processo de desenvolvimento de um processo ou produto é caracterizado por um conjunto de atividades de cunho técnico e gerencial. Essas atividades são transcritas em procedimentos definidos dentro do escopo do projeto em que o processo ou produto encontra-se inserido, e serão traçados planos para composição final do processo ou produto pretendido (CHIAVENATO, 2009).

Numa visão macro este processo é composto por 3 etapas, sendo elas: planejamento, desenvolvimento, e finalização do produto, como apresentado na Figura 35 (ROZENFELD et al, 2006).



FIGURA 35 – PROCESSO MACRO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO/PROCESSO. ADAPTADO (ROZENFELD ET AL, 2006).

Na estrutura apresentada na Figura 35, a etapa de **planejamento** é responsável por realizar uma pesquisa de mercado para entender as necessidades da sociedade e dos consumidores, levantar dados de entradas para o planejamento estratégico do produto; a etapa de **desenvolvimento/manufatura** se encarrega de projetar o produto de acordo com as informações de mercado identificadas na etapa anterior, definir as informações técnicas necessárias para o projeto, elaborar o conceito do projeto, construir uma versão preliminar do projeto, depurar o projeto, iniciar e elaborar versão avançada com base nas melhorias indicadas na versão inicial, preparar para produção; e na etapa de **finalização** efetua-se o lançamento do produto para o mercado, indicar eventuais adaptações na linha de produção com base no *feedback* do mercado e encerrar o ciclo de produção do produto, o descontinuando do mercado (ROZENFELD et al, 2006). Na Figura 36, é ilustrado o fluxo geral de desenvolvimento de produto estratificado.

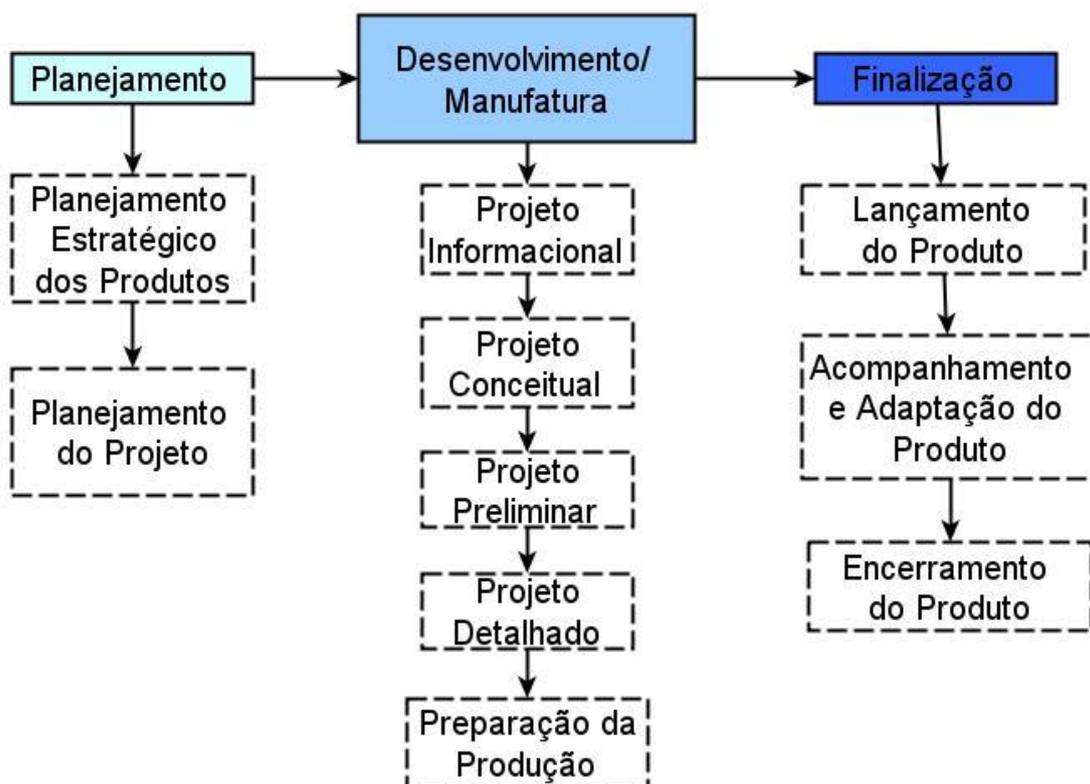


FIGURA 36 - FLUXO GERAL DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO ESTRATIFICADO. ADAPTADO (ROZENFELD ET AL, 2006).

No entanto, um problema que pode ser levantado é que a maioria dos processos de desenvolvimento de produtos adotados na atualidade, como o apresentado de maneira macro no Figura 35, adotam o modelo linear industrial (expresso na ilustração da Figura 37) (WINANS, KENDALL & DENG, 2017).

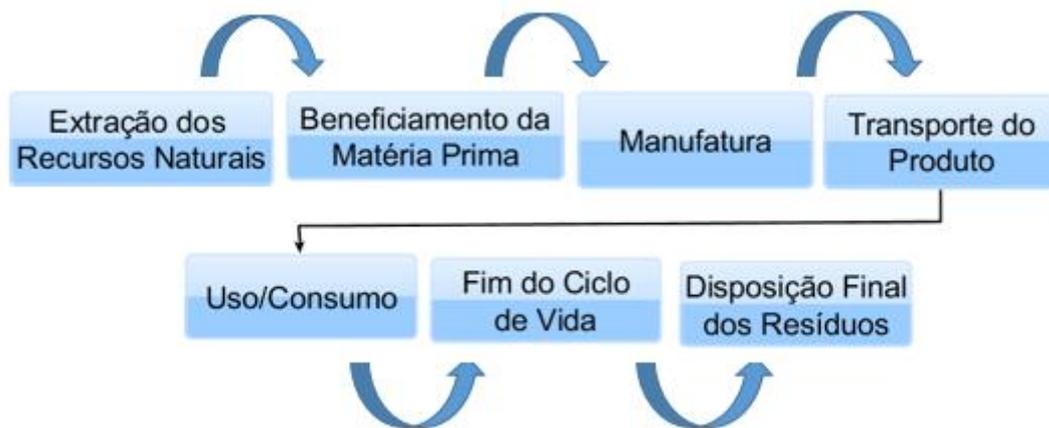


FIGURA 37 – ESTRUTURA LINEAR INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE PRODUTO. ADAPTADO (WINANS, KENDALL & DENG, 2017).

Num cenário competitivo de mercado, atrelado à crescente possibilidade de escassez dos recursos naturais, há a exigência de que as empresas desenvolvam produtos com viés mais sustentável, pois o consumo desenfreado dos recursos naturais e sua indisponibilidade desestabilizam o meio ambiente e, conseqüentemente, a manufatura dos produtos (SEVERO, et al, 2017). Para que seja possível ter processos de produção sustentáveis, é necessário adotar medidas e práticas que envolvam a melhoria de processos, mudanças no *design* de produtos, a adoção da LR e a reciclagem de produtos e componentes já existentes, resultando em menor consumo de matéria prima e de eletricidade (JULIANELLI, et al, 2020).

O processo de adequação de uma planta ou desenvolvimento de um produto que seja classificado como sustentável requer o conhecimento do ciclo de vida do produto e investimento tecnológico, pesquisa de campo para implementação de novas práticas para manufatura e treinamento de equipes, criando então uma nova estrutura de trabalho e empregando ações de melhoria na linha de

produção que sejam revertidas em menos emissões de poluentes para a atmosfera (D'AGATA & MORI, 2012).

Nesse contexto, a nova estrutura a ser adotada para o desenvolvimento de produtos deve seguir o modelo de fabricação industrial circular, em que a reciclagem, remanufatura e o tratamento do fim do ciclo de vida dos produtos são etapas do processo produtivo, conforme o exemplo apresentado na Figura 38 (POLVERINI & MIRETTI, 2019).

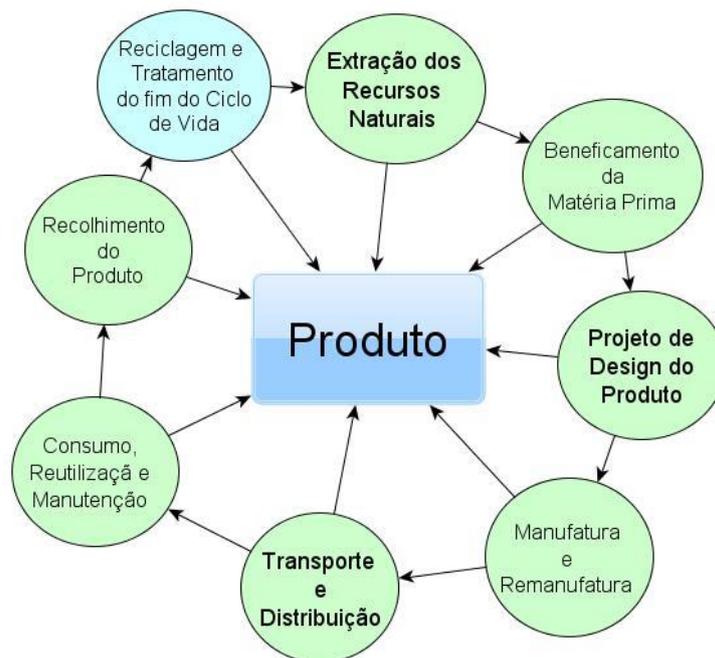


FIGURA 38 – ESTRUTURA CIRCULAR INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE PRODUTO. ADAPTADO (POLVERINI & MIRETTI, 2019).

Esse é o modelo de desenvolvimento de produtos que o presente trabalho adota como referência.

4.3 PROPOSTA DO MODELO

A proposta de modelo para ACV dos transformadores elétricos de potência, baseada no modelo estabelecido pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, é composta por quatro blocos (levando em consideração a literatura de ISO 14040,2009; ALVES & COUTINHO, 2019; SETAC, 1994; ONU, 2005; e

HAUSCHILD *et al.*, 2005 e SEPALLA *et al.*, 2002): produção e uso; fim do ciclo de vida e problemas gerados; proposta de inserção da LR, considerando a adoção do modelo de EC (ZHANG, *et al.*, 2020); e avaliação. A Figura 39 apresenta a estrutura genérica do modelo proposto.

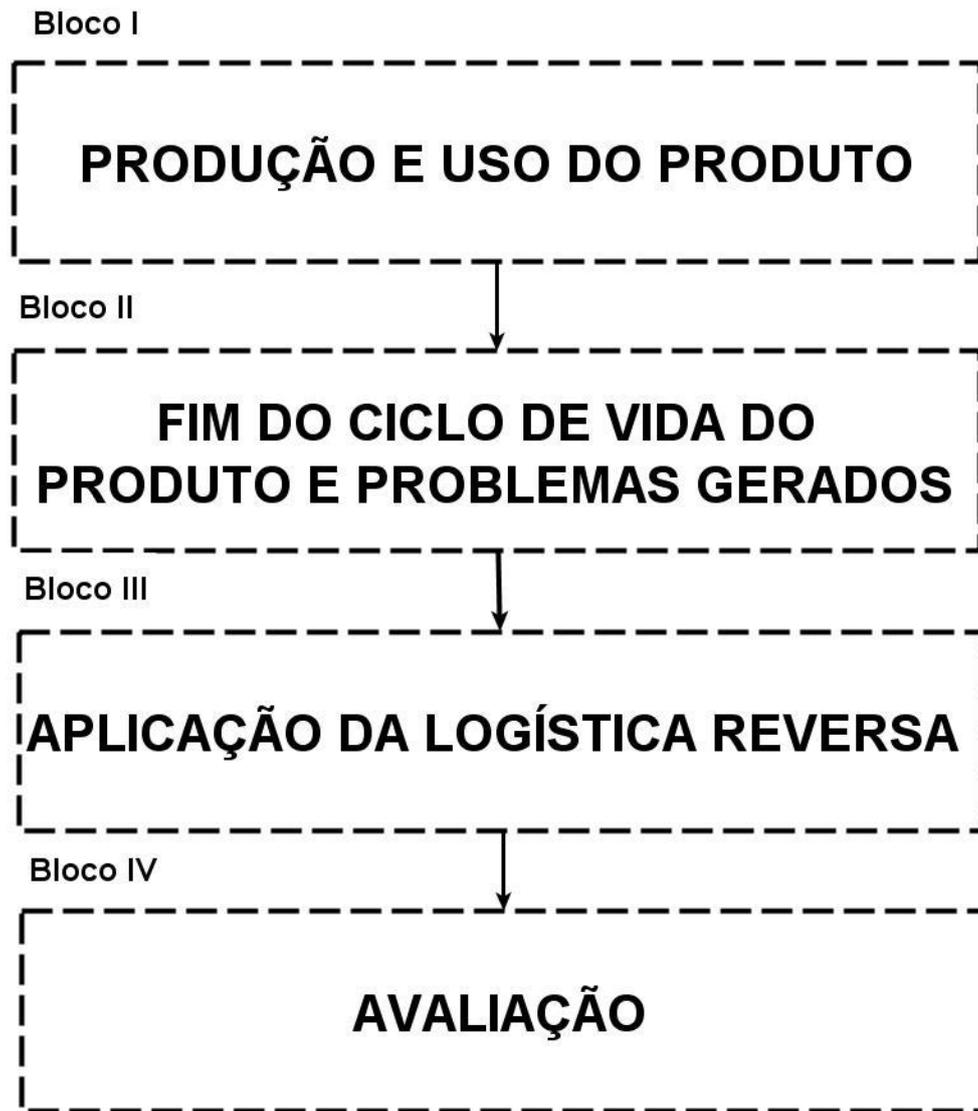


FIGURA 39 – PROPOSTA DE MODELO PARA ACV DE PRODUTO NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR.

A Figura 39 apresenta a proposta de modelo para ACV, na qual seus blocos (brevemente descritos abaixo) estão diretamente relacionados com a estrutura de composição do produto. Uma descrição mais detalhada dos blocos será feita mais adiante.

- O Bloco I – Produção e uso do produto - se relaciona com a definição de objetivo e escopo por especificar o que será considerado dentro do modelo genérico;
- O Bloco II - Fim do ciclo de vida e problemas gerados - se relaciona com a análise de inventário por incorporar os dados referentes ao fim do ciclo de vida do produto e seus problemas gerados além dos dados do bloco anterior para composição da análise do inventário do ciclo de vida;
- O Bloco III – Proposta de LR – apresenta a proposta de aplicação da LR, conforme mostrado na Figura 33, cujo objetivo é minimizar os potenciais impactos ambientais gerados pelo transformador elétrico de potência, construindo uma proposta de reaproveitamento de materiais num contexto de economia circular. Deve ser concretizado em conjunto com o Bloco IV a fim de obter a retroalimentação dos impactos do processo de LR no ciclo de vida do produto.
- O Bloco IV – Avaliação - se relaciona com a avaliação de impacto da ACV dentro do novo contexto de aplicação da LR no modelo tradicional de ciclo de vida. É uma avaliação do produto baseada em ações mitigatórias e na diminuição dos impactos ambientais oriundos do objeto de estudo.

As relações descritas estão ilustradas na Figura 40.



FIGURA 40 – PROPOSTA DE MODELO PARA ACV COM O USO DA LR DE PRODUTO.

4.3.1 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DO MODELO

Nesta seção, são apresentados os componentes pertencentes a cada um dos blocos de composição do modelo genérico.

4.3.1.1 Bloco I - Produção e uso: este primeiro bloco visa identificar os tipos de insumos empregados para a produção dos transformadores elétricos de potência, quantificar a matéria prima, uso da eletricidade, ciclo de beneficiamento de cada um dos insumos utilizados, fabricação dos componentes e montagem do produto. A figura 41, apresenta os componentes que integram este bloco, e logo na sequência é apresentada brevemente a cadeia produtiva de cada um dos elementos que compõem o transformador a fim de melhor contextualizar o uso dos insumos de entrada para a produção de cada elemento.

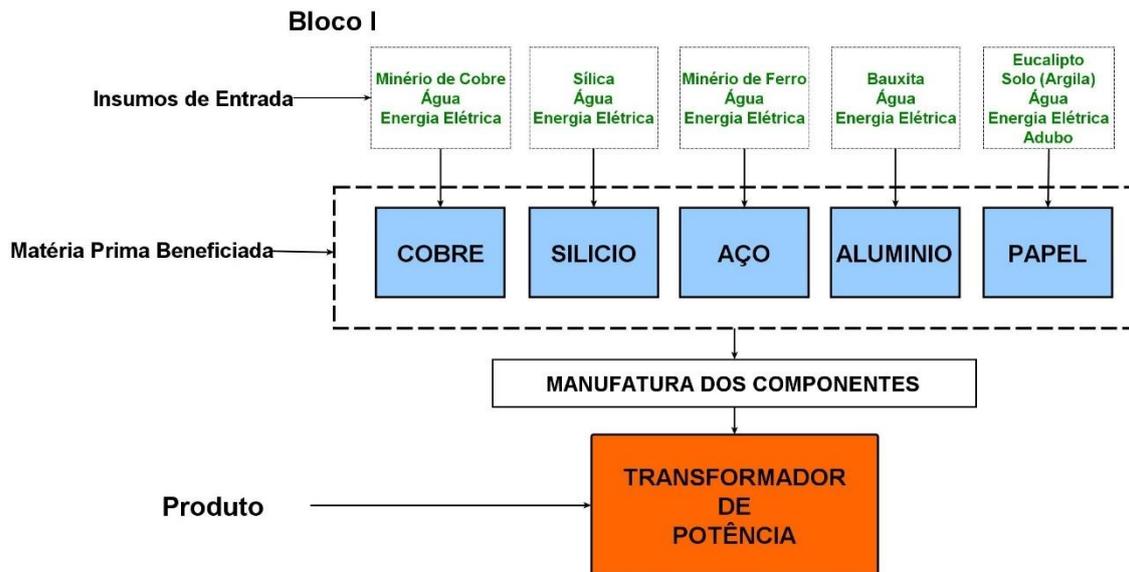


FIGURA 41 – COMPONENTES DO BLOCO I.

As cadeias produtivas (e seus fluxos) presentes no Bloco I, são: cobre, silício, aço, alumínio e papel.

- **Cobre**

A produção do cobre se inicia com o processo de extração do minério de cobre na natureza sendo a base da matéria prima para a produção do material. A matéria prima então passa pelos seguintes processos: britagem/moagem, flotação, secagem e em seguida direcionada ao forno até atingir o blister (determinante para o nível de pureza do cobre), passando então pelo refino (MME, 2010).

Após a composição do ânodo, a refinação eletrolítica é responsável pela composição do cátodo que então se dá origem aos produtos de utilização do material em questão (MME, 2010). A Figura 42, ilustra a cadeia produtiva do cobre, com destaque para os pontos em que há maior incidência de consumo de recursos (naturais, energéticos) e geração de resíduos.

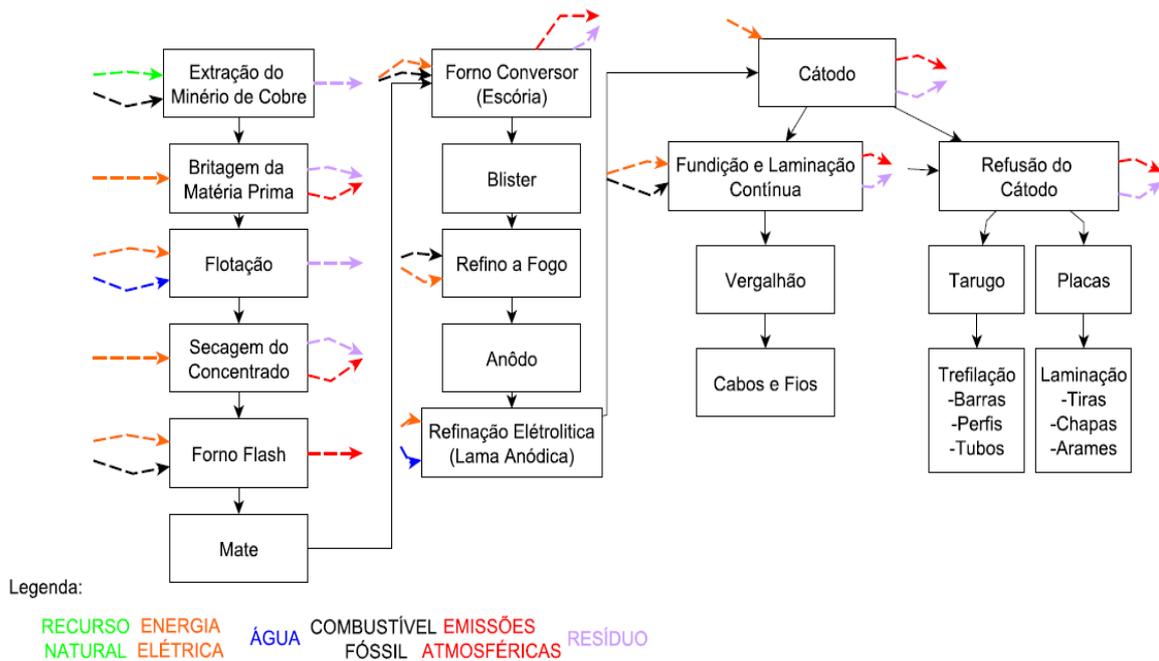


FIGURA 42 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO COBRE.

O Chile é o maior produtor de cobre no mundo com 34%, e respectivamente o Peru 7,58%, China 7,5%, EUA 6,96 e Brasil aparece na décima quinta posição produzindo em torno de 500 mil toneladas sendo a Vale a empresa com maior expressividade no mercado nacional com 46% de tudo o que é produzido (IBRAM, 2012).

Tendo suas aplicações na maioria das vezes direcionada ao setor elétrico e eletrônico por ser considerado um excelente condutor de eletricidade (25% de tudo o que é produzido é empregado no setor elétrico). O cobre também tem aplicações em outros setores como, por exemplo: bens duráveis (10% do montante produzido), no setor de transporte (10% do que é produzido), construção civil (40% da produção), e o setor de máquinas (consumindo 15% do que é produzido) (IBRAM, 2012), resumindo-se em produtos como: molas, válvulas, parte central de radiadores automotivos, disco de embreagem em utensílios de uso doméstico (panelas), pregos, produtos eletrônicos diversos (ANDRADE, 1997).

- **Silício**

Mediante a quantidade de matéria prima disponível na natureza, o silício é considerado o segundo em abundância perdendo apenas para o oxigênio. A origem do material vem a partir da extração do dióxido de silício, passando posteriormente pelos processos de: purificação (em alta temperatura), refino do material, solidificação e preparo para transformação do material em produto final (SILVA, 2009).

O silício é utilizado principalmente no campo da eletrônica por suas características condutivas, classificado como um semicondutor, sendo utilizado na composição de terminais elétricos, de placas de circuito impresso, de núcleos de transformadores, transistores, etc., e ganhando espaço nos últimos anos em seu nos módulos fotovoltaicos para geração de eletricidade (CARVALHO, MESQUITA e ROCIO, 2014). Na Figura 43, é apresentado o fluxo de produção do silício, com destaque para os pontos em que há maior incidência de consumo de recursos (naturais, energéticos) e geração de resíduos.

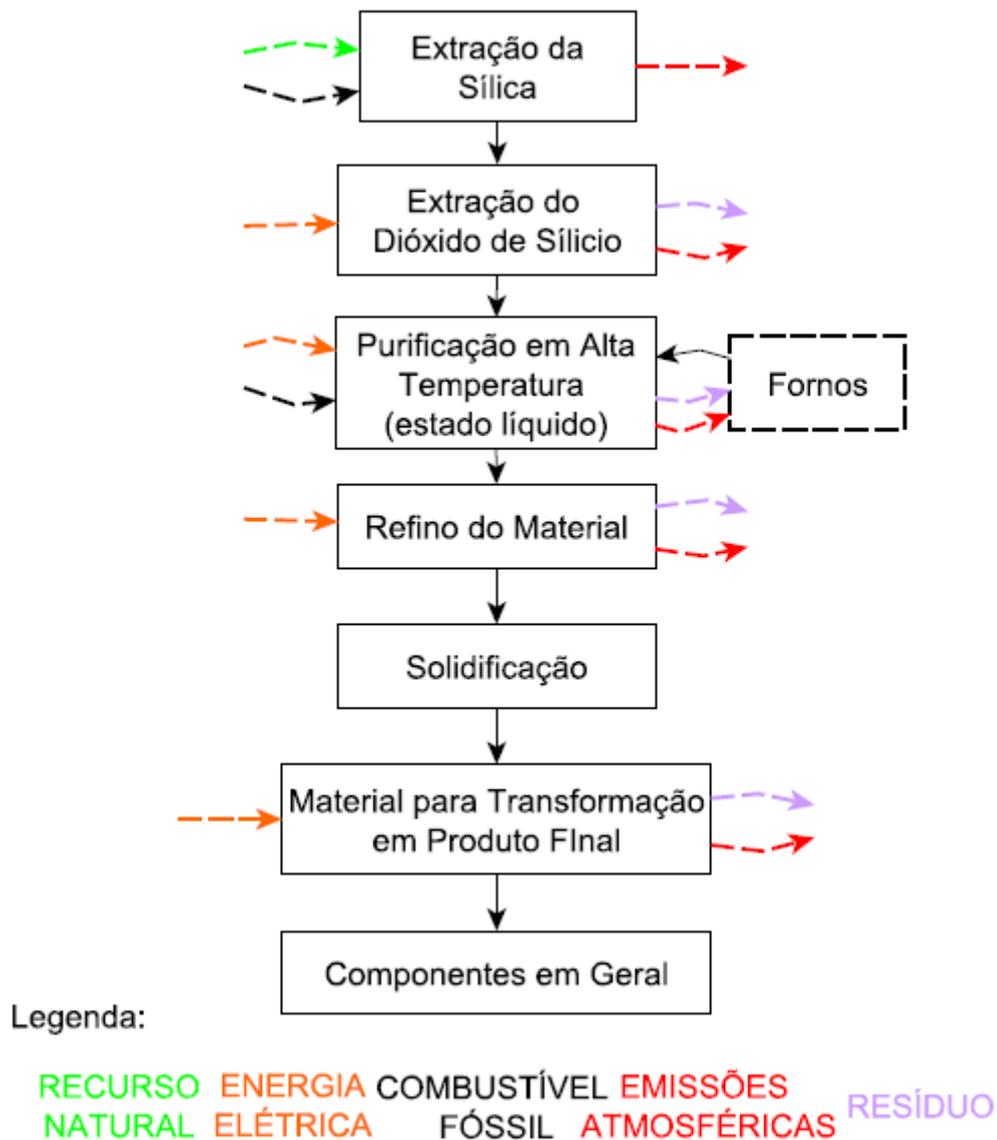


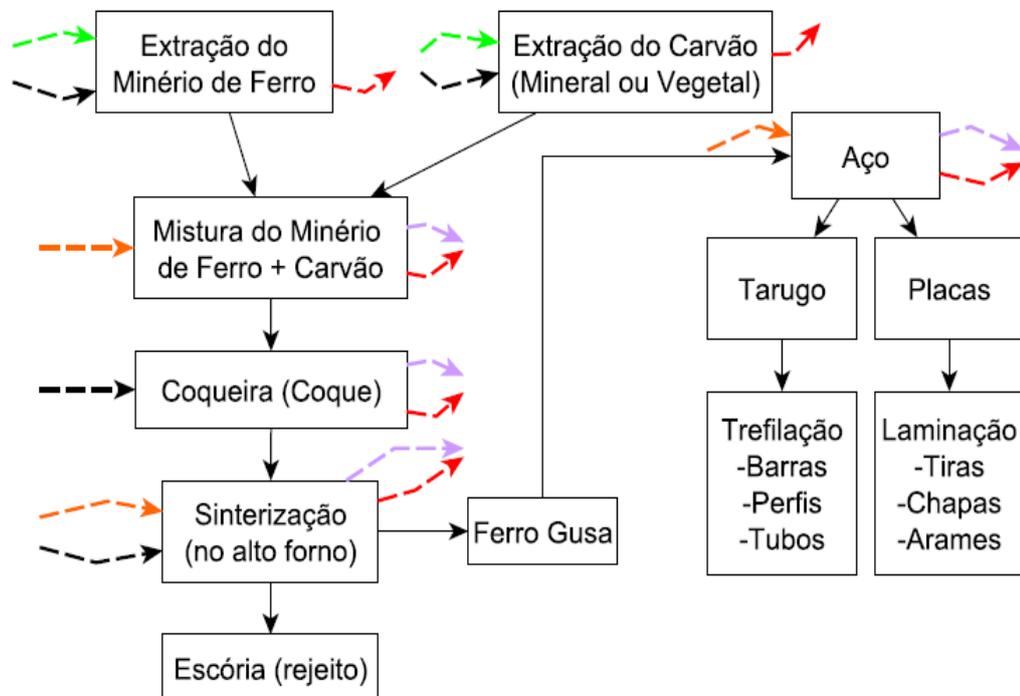
FIGURA 43 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO SÍLCIO.

- **Aço**

Tratando sobre a produção do aço, registros apontam que a humanidade utiliza o minério de ferro rico em concentração de carbono (considerado o quinto elemento em maior abundância na crosta terrestre) desde 1200 a.c (COSTA, 2002).

O fluxo de produção da liga de aço se discorre entre as seguintes etapas: extração os recursos naturais (minério de ferro e carvão), mistura do ferro e carvão, formação do coque, sinterização, formação do aço que toma o caminho

da aplicação em formato de produto (COSTA, 2002). A Figura 44, apresenta o fluxo de produção do aço, com destaque para os pontos em que há maior incidência de consumo de recursos (naturais, energéticos) e geração de resíduos.



Legenda:

RECURSO ENERGIA COMBUSTÍVEL EMISSÕES
NATURAL ELÉTRICA FÓSSIL ATMOSFÉRICAS RESÍDUO

FIGURA 44 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO AÇO.

A produção em larga escala do aço ocorreu a partir do século XVIII, e nos dias atuais a produção anual está em torno de 1000 MT. O aço é muito procurado pela indústria por ter como características: deformidade plástica, custo relativamente barato de produção, alteração de composição química mediante aplicação, capacidade de reciclagem (NOLASCO e TENÓRIO, 2013).

- **Alumínio**

A produção do alumínio tem o seu início com a extração do minério da bauxita em formato de rocha, encontrada em uma camada de extração a poucos metros da superfície do solo. Em seguida a rocha é britada e refinada, nesta etapa se extrai a alumina (óxido de alumínio), resultado este obtido pela dissolução da bauxita através de uma fonte de calor com outros dois elementos: cal e soda cáustica (IBRAM, 2012).

Após estes processos de aquecimento e refinamento o material é posto para solidificação e transformado em alumínio. As aplicações do alumínio são diversificadas como, por exemplo: utilização no setor industrial, no setor elétrico, em eletrônicos, em utensílios domésticos, na construção civil, em indústrias automobilísticas, estruturas, etc (CARDOSO *et al.*, 2011).

Na Figura 45 é apresentado o fluxo simplificado da produção de alumínio, com destaque para os pontos em que há maior incidência de consumo de recursos (naturais, energéticos) e geração de resíduos.

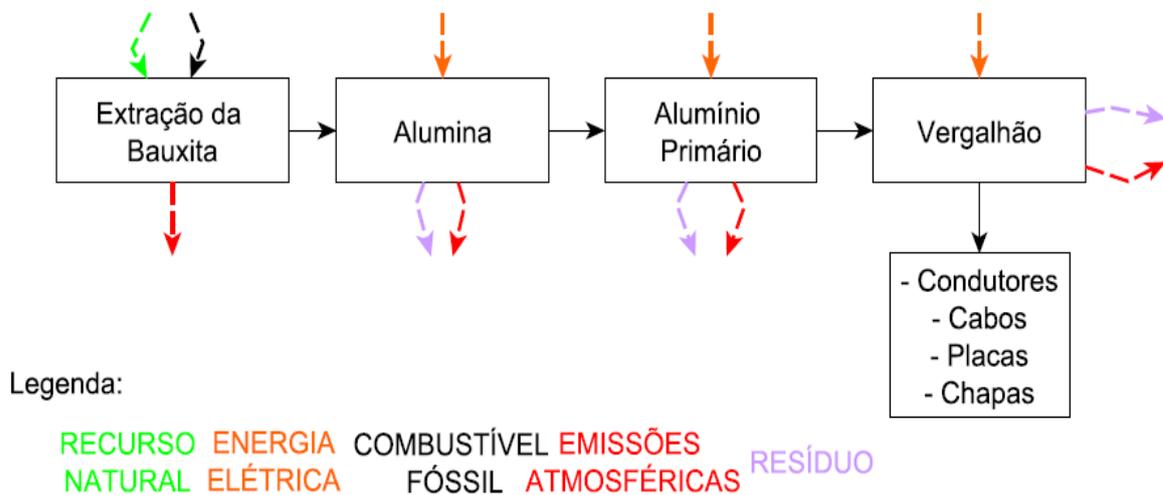


FIGURA 45 – FLUXO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO.

O alumínio é apontado como o terceiro elemento na escala de maior abundância na crosta terrestre. E o Brasil detém a terceira maior jazida de bauxita do mundo,

sendo o segundo produtor do minério de bauxita do planeta e o sexto em produção do alumínio primário, cerca de 1,5 milhão de toneladas (ABAL, 2014).

- **Papel**

Em relação à produção do papel, é necessário o cultivo de uma floresta de árvores para corte. Normalmente são utilizadas florestas de árvores de eucalipto devido à sua característica de rápido crescimento, atingindo o tempo de corte em sete anos (ALVES *et al.*, 2011).

Após o corte da árvore, a madeira é descascada e triturada, para facilitar o processo de cozimento e aproveitamento da celulose concentrada no interior da madeira. O processo de cozimento provém uma pasta concentrada de celulose, que em seguida passa por lavagem, para retirada de algumas substâncias químicas adicionadas junto ao cozimento (WETTERLUND, PETTERSSON e HARVEY,2011).

Em seguida o material é colocado em uma mesa plana para descanso, sendo finalizado pela passagem de rolos de compactação, secagem e confecção dos produtos (WETTERLUND, PETTERSSON e HARVEY,2011). O fluxo do processo produtivo do papel é apresentado na Figura 46, com destaque para os pontos em que há maior incidência de consumo de recursos (naturais, energéticos) e geração de resíduos.

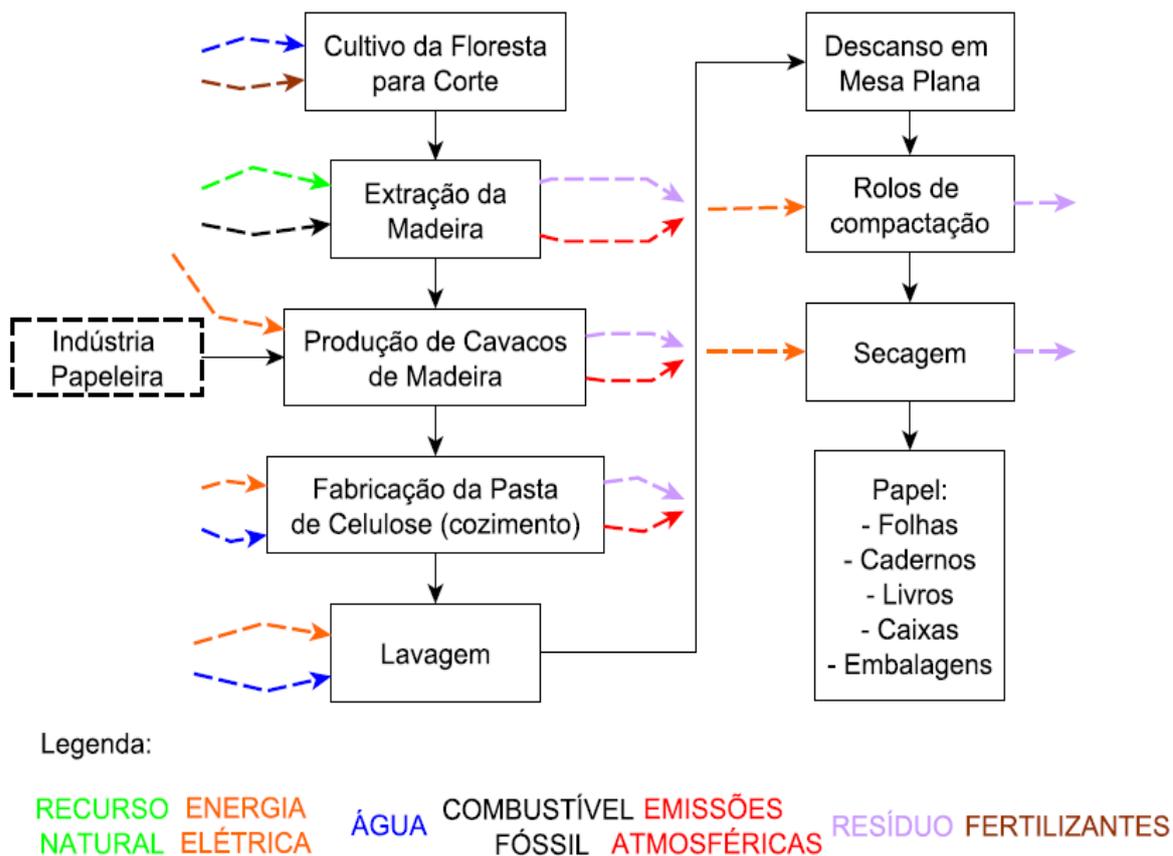


FIGURA 46 - FLUXO DE PRODUÇÃO DO PAPEL.

Sobre a distribuição da produção anual de celulose mundo o EUA aparece na primeira posição com 48,5 toneladas, em segunda posição China com 17,8 toneladas, Canadá na terceira posição com 17,6 toneladas e o Brasil na quarta posição com uma produção de 17,2 toneladas (EPE, 2018).

Com relação à produção anual do papel, a China aparece em primeiro lugar com 107,1 toneladas, EUA em segundo lugar com 72,7 toneladas e o Brasil aparece em sétimo lugar produzindo 10,3 toneladas (EPE, 2018).

No entanto o Brasil tem o menor custo de produção do mundo para produção de celulose US\$ 463,10 por tonelada da substância. E a maior eficiência de produção por hectare apenas 93 mil para a produção de 1 tonelada de celulose, enquanto a China se encontra em segundo lugar em eficiência de produção por hectare precisa de 200 mil para a produção de 1 tonelada (EPE, 2018).

4.3.1.2 Bloco II - Fim do ciclo de vida do transformador de potência e problemas gerados: nesse bloco, é realizado o balanço de massa do produto após o fim do seu ciclo de vida, separação, identificação e seleção dos componentes do produto para construção do inventário do ciclo de vida, identificando também o estado atual de peças e dos componentes, direcionando-os para um caminho de reuso ou destinação final para o resíduo. Na Figura 47 são ilustrados todos os componentes que constituem este bloco e os problemas ambientais gerados por esses componentes ao final do respectivo ciclo de vida.

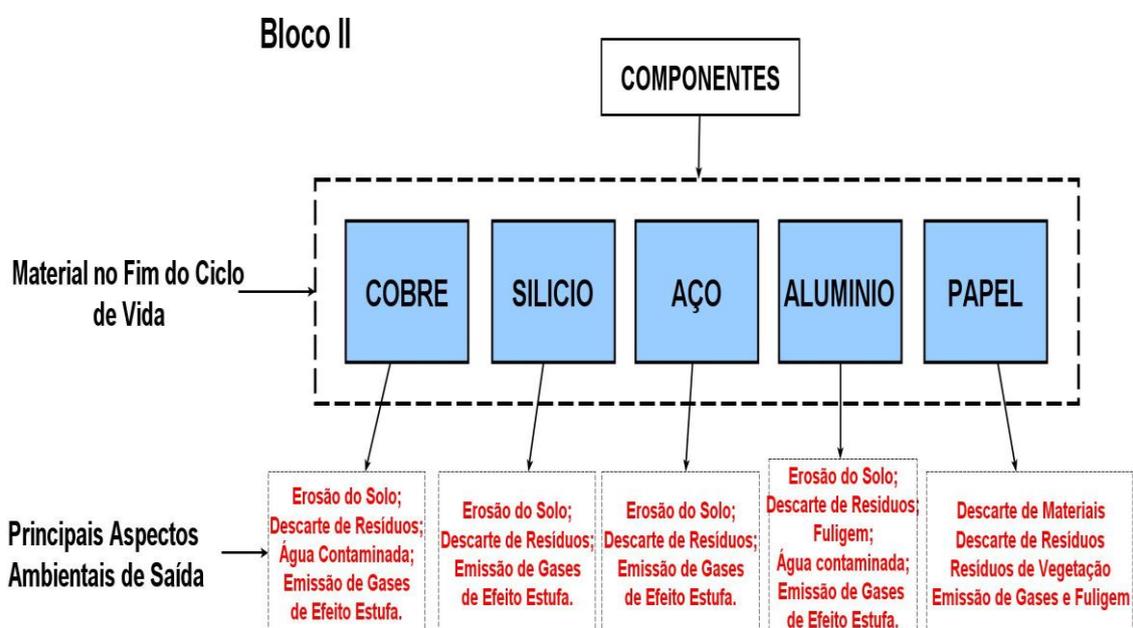


FIGURA 47 – BLOCO II.

Os problemas ambientais destacados na Figura 47, são brevemente descritos seus impactos apresentados na sequência:

❖ Erosão do Solo

A erosão do solo pode ocorrer em duas formas: natural ou pela ação do homem. A forma natural de ocorrência da erosão do solo acontece em função do movimento da água (em seu estado líquido ou sólido) e dos ventos sobre uma

superfície seja ela de solo ou rocha, removendo vagarosamente as partículas presentes nesta superfície. Já o processo de erosão provocado pela ação do homem consiste na utilização de máquinas e ferramentas para movimentação e remoção do solo ou rochas para extrair insumos e matérias primas a serem utilizados em processos de manufatura fabril ou para a construção de edificações (ANANDA e HERATH, 2003).

Na grande maioria das vezes a erosão do solo é uma atividade praticada pelas indústrias de mineração, que trabalham neste processo munidas de máquinas e ferramentas de grande porte para extração dos minérios presentes em uma determinada região. Também na maioria das vezes este processo prejudica a qualidade do solo e do ecossistema tanto em escala local (em que os habitantes da região são os mais prejudicados com os problemas gerados) quanto em escala global (em que os problemas gerados são somatizados com os problemas de outros ecossistemas causando por exemplo aumento da emissão de GEE) (GUERRA, 2005).

Os problemas causados pela erosão do solo podem ser irreversíveis se as estratégias de recuperação do mesmo não forem aplicadas logo após o encerramento do processo de extração dos recursos e nutrientes presentes naquele solo. Os problemas mais comuns provocados pela extração de recursos naturais são: desmatamento da vegetação nativa, remoção da camada superficial do solo o expondo a contaminantes, assoreamento de rios e reservatórios naturais de água, exposição de lençóis freáticos, infertilização do solo prejudicando o reflorestamento da área e a recuperação da vegetação nativa (COGO, LEVIEN e SCHWARZ, 2003).

As ações antrópicas em busca da extração de recursos naturais oriundas, principalmente, das atividades ligadas à mineração, causam também alteração da temperatura média do clima local (micro-clima), alteração do ciclo de precipitações, surgimento de sulcos no solo após precipitações, perda da qualidade da água, perda da qualidade do ar, colapso na sustentação natural do terreno, alteração do pH da terra, perda da fauna e flora (CAMPOS, 2010).

Todos os aspectos levantados acima, sobre a extração de minérios da natureza, alguns apresentam maior incidência de captação para o abastecimento da cadeia de suprimentos da indústria de manufatura, em que se destacam: o minério de cobre, o minério de ferro e a bauxita, que produzem bilhões de toneladas de resíduos e contribuem para todos os impactos ambientais mencionados acima, bem como para os seres humanos, cujos problemas mais comuns relatados na literatura e por especialistas são: dificuldade de respiração, náusea, vômito, disfunção intestinal e risco de câncer em função do acúmulo de metais pesados descartados e depositados a céu aberto sem tratamento prévio (CAMPOS, 2010).

❖ Descarte de Resíduos

O descarte de resíduos é o fruto das atividades manufatureiras e do consumo de bens, serviços e produtos adquiridos pela população; o fato é que este descarte deveria ser organizado, categorizado e recolhido, com separação por tipo de material e assim ser tratado de acordo com o recomendando pelas diretrizes ambientais de cunho: local, nacional e global (SILVA et al., 2013).

Neste trabalho o descarte de material é considerado nas atividades de manufatura do transformador elétrico de potência, bem como os descartes de materiais no pós consumo do equipamento. As atividades de manufatura e de extração dos recursos naturais provocam a formação de rejeitos de mineração, seja em sua forma sólida (acúmulo de solo da camada superficial ou em acúmulo de rochas britadas durante o processo de explosão para acesso ao minério e abertura da mina), ou ainda em estado líquido, em que os rejeitos são gerados após a efetivação de ações e processos químicos presentes no beneficiamento da matéria prima (NATUME e SANT'ANNA, 2013).

Assim como a erosão do solo mencionada anteriormente, o descarte de resíduos também causa problemas ambientais ao solo, água, ar e, conseqüentemente, aos indivíduos. Os problemas recorrentes são: extinção da área de florestas, fauna, flora, contaminação da água, formação de montanhas e ilhas de lixo seja em aterros sanitários a céu aberto ou em áreas irregulares dentro ou fora de

canteiros de mineração, zonas rurais ou urbanas. No Brasil este descarte inadequado atinge 56% do total dos municípios em todo o país (ROSA, 2018).

Além dos problemas ambientais relatados, outro grande problema do descarte inadequado de resíduos é proliferação de endemias, pois os resíduos podem servir como ponto de proliferação de insetos causando a disseminação de doenças como: Zica, Dengue, Chikungunya; e ratos vetores transmissíveis de doenças como: Peste Bubônica, Salmonelose, Leptospirose, dentre outras. Em 2016 no Brasil foram gastos por volta de R\$ 1 bilhão de reais na saúde pública destinados ao tratamento de doenças oriundas do descarte incorreto de resíduos (lixo) dado ao fato de que apenas 13% dos resíduos sólidos do território nacional é reciclado (prejuízo de R\$5,7 bilhões ao ano) (JESUS et al., 2020).

❖ Poluição hídrica

A água, depois do oxigênio, é o segundo insumo mais ingerido por todos os seres vivos, e está presente na maioria das atividades do cotidiano de instituições e indústrias, seja como insumo, seja para suas atividades de higiene. Porém algumas organizações têm como estratégia de disposição de seus rejeitos os imergir em lagos, nascentes e rios tanto na área urbana (caso principal das indústrias de manufatura) como na zona rural (principal caso das indústrias de mineração) (TOMASONI *et al.*, 2009).

A poluição hídrica, considerada um problema sócio ambiental grave, acomete no campo e nos centros urbanos as fontes de água doce; porém, existe também um grande acúmulo de descarte de resíduos sólidos e líquidos em áreas de água salgada (mares), prejudicando a qualidade de vida dos ecossistemas em diferentes frentes vegetação e vida de seres vivos aquáticos (DE ANDRADE e FELCHAK, 2009).

Os principais problemas gerados pelo setor de mineração e manufatura de produtos com relação à poluição hídrica são: perda, por contaminação, de lençóis freáticos; contaminação de nascentes, lagos, lagoas, represas e bacias hidrográficas; mudança do curso de rios; impedimento da passagem da luz solar

para o meio aquáticos; formação de pontos de “sopas plásticas” (vasta concentração de material plástico que, com o passar do tempo, entra em decomposição e forma material particulado altamente prejudicial às espécies aquáticas e à saúde humana), também conhecidos na forma do impacto ambiental denominado eutrofização da água (DELLAMATRICE *et al.*, 2014).

Não se pode deixar de ressaltar que a falta de saneamento básico no Brasil e no mundo é também um dos principais contribuintes para a poluição hídrica, causando danos diretos na qualidade de vida aquática e ambiental em todos os ecossistemas, assim como outras fontes de poluição como: poluição térmica, poluição sedimentar, poluição biológica e poluição química (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

❖ Emissão de Gases do Efeito Estufa e Fuligem

A emissão de poluentes na atmosfera por meio de gases expelidos dos processos de manufatura e da queima de combustíveis, dentre outras atividades do cotidiano humano, assim como a decomposição de matéria orgânica em aterros e a combustão de rejeitos de todas as atividades manufatureiras causam alta concentração de substâncias como: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ozônio (O₃), óxido nitroso (N₂O) e o clorofluorcarbonos (CFC_s) (COSTA, 2016).

Os gases deterioram a camada de ozônio, aumentam a incidência dos raios solares no planeta Terra causando aumento da temperatura global, derretimento das calotas polares, aumento do nível dos mares, desequilíbrio hídrico em determinadas regiões, aumento da formação de áreas de deserto, extinção de espécies de fauna e flora, perda da qualidade do ar, aumento do desenvolvimento de doenças respiratórias, formação de chuva ácida, aumento da ocorrência de desastres ambientais como: furacões, terremotos, maremotos e tsunamis (KIRCHHOFF, 2011).

A formação de fuligem é problema ambiental relacionado à qualidade do ar, dado o excesso de gases poluentes que provocam a formação de material particulado disseminado na atmosfera, principalmente em áreas e regiões urbanas com alto teor de industrialização e grande volume de tráfego de veículos terrestres, sendo

classificada como o segundo maior fator humano causador do aquecimento global (KALVAKALA et al., 2020).

A fuligem pode permanecer presente na atmosfera por um período entre 7 a 10 dias causando problemas ambientais como os já mencionados e outros na ordem da saúde humana como: desenvolvimento de síndrome e doenças respiratórias crônicas, desenvolvimento de alergias, risco de infarto e contribuição para o desenvolvimento de câncer no pulmão (MESQUITA e NAGAMINE, 2009). Tanto a emissão de gases do efeito estufa quanto a formação de fuligem são dois feitos em ascensão global que comprometem diretamente e diretamente a sustentabilidade ambiental e da vida humana na terra (CARVALHO et al., 2010).

❖ Resíduos de Vegetação

A indústria da manufatura de papel, além dos seus rejeitos líquidos, tem como rejeito sólido restos da vegetação extraída e dos troncos das árvores coletados para produção de celulose. É fato que a concentração destes resíduos de vegetação sem uma gestão adequada pode causar problemas como: incêndios, degradação da paisagem, formação de ilhas de calor, contribuição para enchentes, poluição do solo, água e ar (LOPES, 2016).

4.3.1.3 Bloco III - Proposta de uso da LR: apresenta uma solução de LR e remanufatura dos componentes que são avaliados, após o final do ciclo de vida do transformador, como em estado satisfatório para compor um produto de caráter remanufaturado. Essa proposta considera estratégias que visam a redução do impacto ambiental que o simples descarte dos componentes pode acarretar (em uma transição de visão de Economia Linear para Economia Circular) (Figura XX), e ainda aponta o desenvolvimento de ações e fluxogramas que contemplam os gatilhos de ações mitigatórias de acordo com o prescrito pela Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010 com decreto nº7.404 de 23 de dezembro de 2010 tratando sobre os instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), CONAMA e Normas ABNT/ISSO 14000 e 14001, como: reutilização da matéria prima, diminuição do consumo de energia elétrica,

diminuição do consumo de água, tratamento dos resíduos, tratamento do solo e tratamento da água. Na Figura 48 é apresentada a estrutura proposta para o Bloco III.

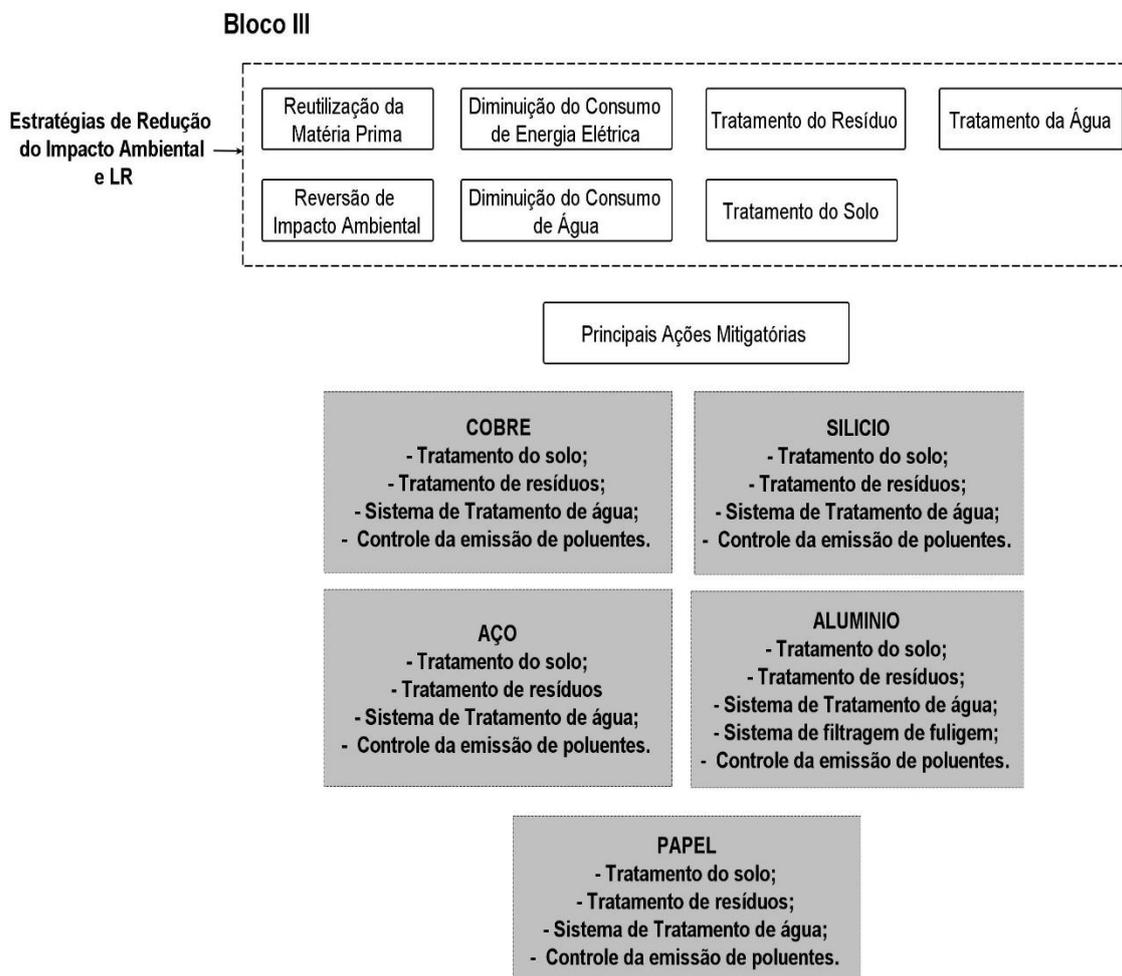


FIGURA 48 – COMPONENTES DO BLOCO III.

Após a definição dos componentes do Bloco III, são apresentados os pontos estruturantes para tratamento e aplicação das estratégias de redução do impacto ambiental e LR. Estruturou-se um Sistema de Logística Reversa (SLR), estruturado a partir das informações levantadas nos estudos de caso da produção e da remanufatura dos transformadores elétricos de potência¹, que é abordado (dividido/setorizado) da seguinte maneira: requisitos de montagem da

¹ Os estudos de caso serão apresentados no capítulo 4, mas serviram de base para a elaboração da proposta que ora se discute.

estrutura de LR; categorização das fases do SLR para transformadores elétricos de potência; e processos do SLR para transformadores elétricos de potência.

As estratégias de redução do impacto ambiental contribuem para que os processos produtivos ocorram de maneira “mais limpa” e para que a regeneração do meio ambiente tenha espaço para se restabelecer de maneira gradativa e organizada, convergindo para a obtenção de melhores índices de qualidade da água, solo e emissões atmosféricas.

- **Requisitos de montagem da estrutura de LR:** são os requisitos gerais para a construção de uma estrutura de LR em cadeia fechada.

O conceito de *loop* fechado (cadeia fechada) da cadeia de suprimentos de entradas e saídas do sistema, prioriza o emprego dos materiais já existentes por meio de: reciclagem, remanufatura e disposição adequada dos resíduos impossibilitados de se enquadrar nas classificações anteriores. O fluxo do sistema é apresentado na Figura 49.

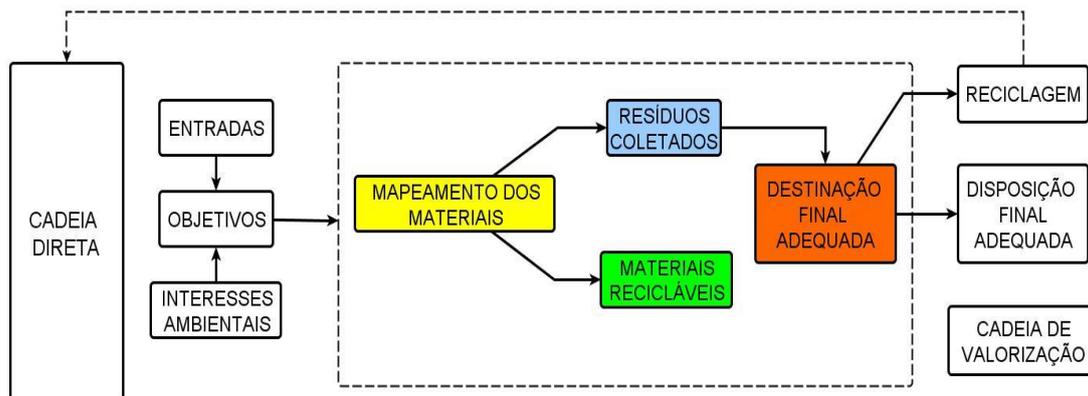


FIGURA 49 – FLUXO DO SISTEMA EM CADEIA FECHADA DO SLR.

A atividade crucial para a completude do SLR em cadeia fechada é o mapeamento dos materiais, que irá classificar quais são os materiais pós-consumo a serem direcionados automaticamente para reciclagem dentre as outras ações existentes no 10Rs ou propor uma destinação adequada.

➤ **Categorização das fases do SLR para transformadores elétricos de potência:**

A categorização das fases do SLR para transformadores elétricos de potência, a partir do pós-consumo do produto, contribui para o posicionamento do modelo com relação ao fluxo de cada uma das atividades a serem executadas em cada etapa. O fluxo apresentado na Figura 50 visa, a partir de sua aplicação, estabelecer o grupo de atividades para cumprimento do SLR, distribuídas dentro dos pilares da LR que também contribuem para análise dos estudos de ACV deste trabalho, sendo eles: geração de resíduos, gerenciamento dos resíduos, valorização dos resíduos e reinserção dos resíduos novamente na cadeia produtiva.

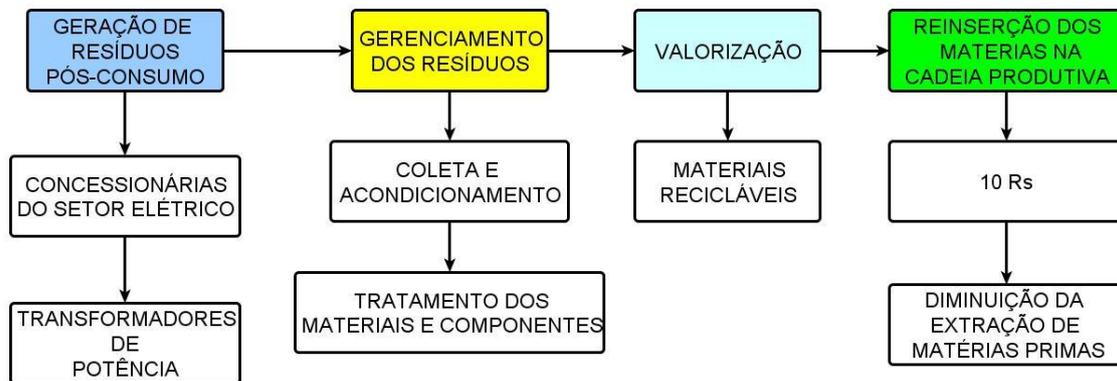


FIGURA 50 - CATEGORIZAÇÃO DAS FASES DO SLR PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

A categorização das fases do SLR, para o caso dos transformadores elétricos de potência, permite também entender que o gerenciamento dos resíduos, quando executado de maneira adequada, promove a criação de valor nos materiais existentes quando reciclados e reencaminhados para remanufatura, sendo inseridos novamente na cadeia produtiva (bem como os demais “R” do conceito de 10 Rs), caminhando assim para um ciclo produtivo que se orienta para a filosofia de economia circular.

➤ **Processos do SLR para transformadores elétricos de potência:**

O SLR desenvolvido envolve empresas consumidoras dos transformadores elétricos de potência e empresas que trabalham com coleta e logística reversa voltadas ao mercado de equipamentos elétricos, e que estão diretamente relacionadas às 3 fases do fluxo de atividades: geração dos resíduos pós consumo, gestão dos resíduos e disposição final dos resíduos, conforme mostra a Figura 51.

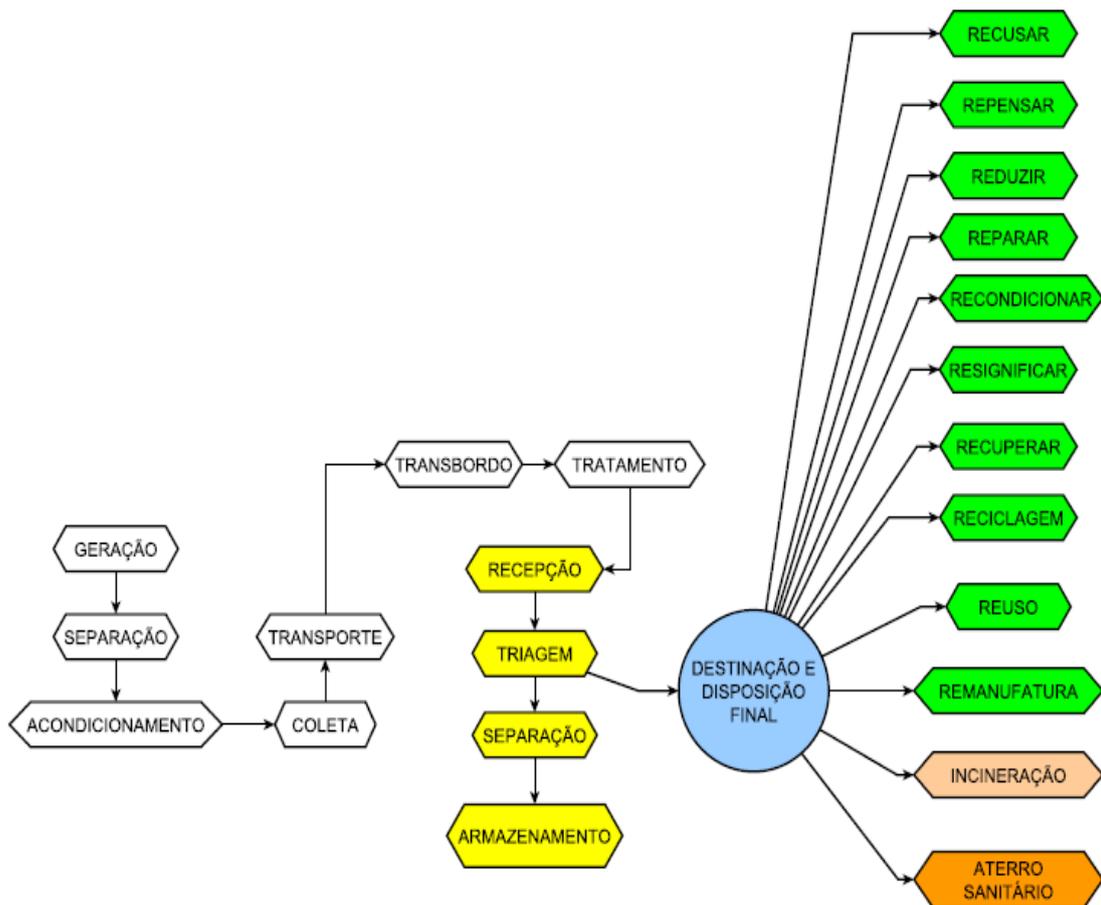


FIGURA 51: PROCESSOS DO SLR.

Os transformadores elétricos de potência são classificados como REEE (Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos) e, de acordo com a própria Política Nacional de Resíduos Sólidos (estabelecida no ano de 2010), todas as indústrias de manufatura, consumidoras e vendedoras dessa classe de

produtos/equipamentos são obrigadas a ter em sua estrutura de pós consumo estratégias de descarte adequado para o fim do ciclo de vida destes produtos/equipamentos (levando em consideração os aspectos ambientais, econômicos e sociais). A recomendação da Lei é de que as empresas em geral, em parcerias com cooperativas de coleta de resíduos urbanos, trabalhem construindo uma rede de colaboração, promovendo a reinserção na cadeia produtiva de produtos/equipamentos, sejam eles usados ou remanufaturados.

No caso dos REEs (em que o transformador elétrico de potência também se enquadra), o SLR deve, além das etapas descritas na Figura 51, incluir as atividades e os processos de retorno em situação de pós consumo para equipamentos que eventualmente apresentem problemas de operação quando ainda esteja vigente o prazo de garantia desses equipamentos, conforme ilustrado na Figura 52.

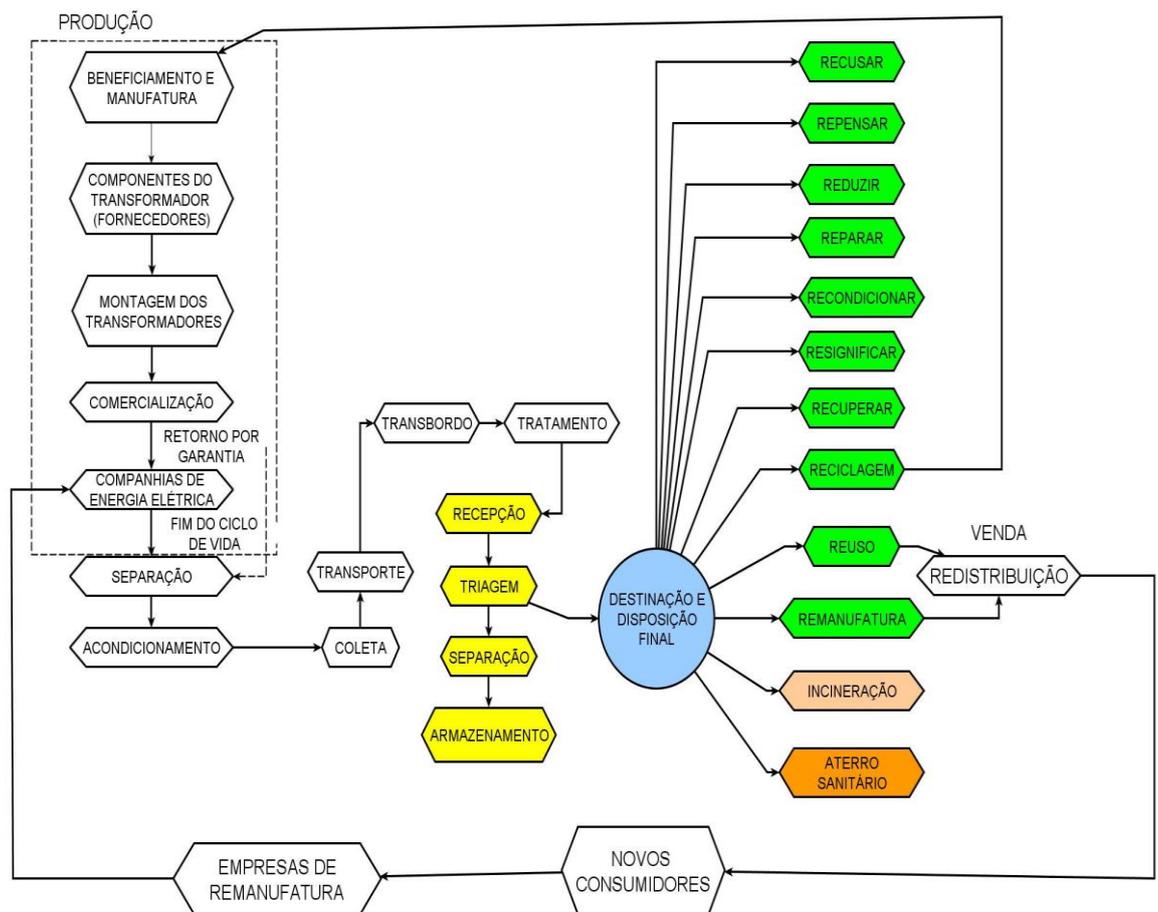


FIGURA 52: PROCESSOS DO SLR PARA REE.

4.3.1.4 Bloco IV - Avaliação: neste último bloco do modelo, são apresentados os dados quantitativos das categorias de impacto ambiental selecionadas para avaliação do perfil ambiental do produto, a partir dos dados presentes nos blocos anteriores. Na figura 53 é ilustrada a composição do bloco IV, com destaque para as potenciais categorias de impacto ambiental consideradas para a avaliação do presente estudo.

Bloco IV

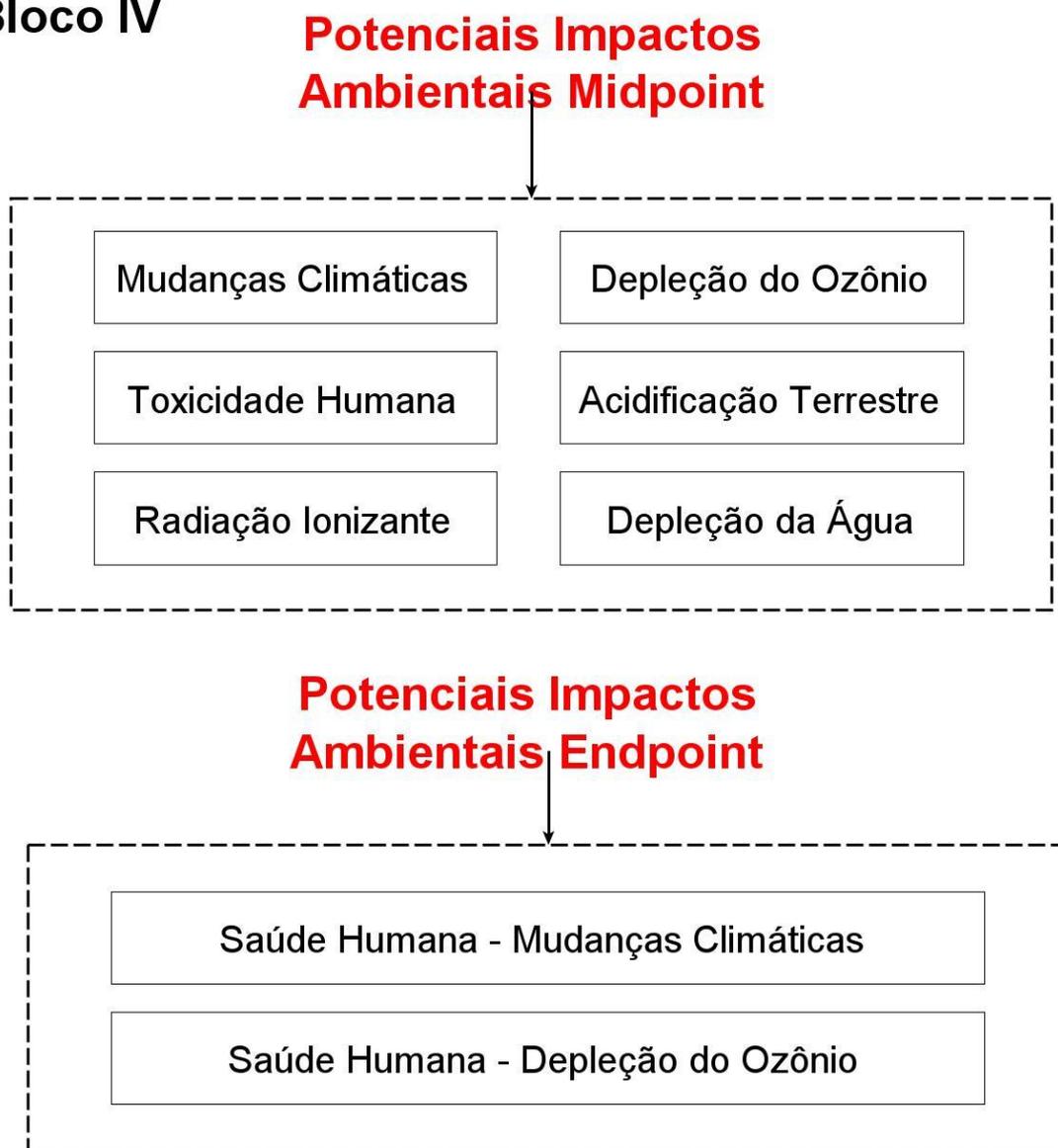


FIGURA 53 – COMPONENTES DO BLOCO IV.

As categorias de potenciais impactos ambientais presentes na avaliação desta pesquisa são:

- ❖ **Mudanças Climáticas (*midpoint*):** ocasionada principalmente pela emissão de CO₂ e CH₄ lançados na atmosfera resultando no efeito estufa tão prejudicial manutenção saúde pública, da vida humana, animal e vegetal, causando tendência de incerteza as estações do ano (clima), aumento da temperatura global da Terra, ocorrência de desastres ambientais, aumento de inundações em áreas de do perímetro urbano, ausência de chuvas em outras regiões contribuindo para a formação de áreas de deserto em várias localidades do planeta (prejuízo para o setor agropecuário) (COELHO JUNIOR *et al.*, 2017).

- ❖ **Toxicidade Humana (*midpoint*):** classificada como uma categoria de potencial impacto ambiental que afeta diretamente a qualidade respiratória da atividade humana podendo ser em escala: local, regional ou global. Ocasionalmente por meio de atividades antrópicas emissora de poluentes químicos na atmosfera com teor de envenenamento (em casos mais críticos) por substâncias tóxicas e não biodegradáveis (LUÍS, 2017).

- ❖ **Radiação Ionizante (*midpoint*):** esta categoria de potencial impacto ambiental quantifica o nível radiação presente no meio a serem descarregados sobre a atmosfera e conseqüentemente na superfície terrestre, nas plantas, animais e indivíduos podendo causar danos irreversíveis as células do corpo humano (a depender da intensidade do nível de radiação e exposição do indivíduo) (LUÍS, 2017).

- ❖ **Depleção do Ozônio (*midpoint*):** quantifica o potencial dano de destruição da camada de ozônio, ocorre em função da alta emissão de

clorofluorcarbonos (CFCs), rompendo as moléculas do ozônio, promovendo a incidência dos raios solares na Terra contribuindo também para o aumento da temperatura global do planeta e mudanças climáticas (SAADE *et al.*, 2014).

- ❖ **Acidificação Terrestre (*midpoint*):** configura-se em desequilíbrio do pH terrestre com elevação da acidez ao meio comprometendo a qualidade do solo e da água presente no mesmo. Dificultando ou até mesmo inviabilizando o cultivo de vegetação na área afetada (SAADE *et al.*, 2014).

- ❖ **Depleção da Água (*midpoint*):** indica quantitativamente o potencial impacto de diminuição da capacidade hídrica em função do consumo deste recurso natural para uma determinada atividade produtiva. Os níveis de depleção da água em larga escala podem inviabilizar uma região comprometendo por exemplo o acesso a água para a população e o cultivo da agricultura (ARDUIN *et al.*, 2016).

Para efetivação da avaliação deste bloco e cálculo categorias de potenciais impactos ambientais é necessário fomentar todos os elementos da estrutura da ACV descritos no Capítulo 3 deste trabalho. A seguir são declarados todos os processos e procedimentos para composição da avaliação do objeto de estudo.

- ❖ **Saúde humana – Mudanças climáticas (*endpoint*):** relaciona a quantitativamente a categoria “Mudanças Climáticas em nível *midpoint*”, com ações diretas sobre a piora da saúde e qualidade de vida humana quando exposto a um cenário principalmente de aquecimento global, como por exemplo disseminação de doenças respiratórias fruto da poluição atmosférica, estresse térmico e dificuldade de hidratação hídrica

corporal são alguns dos danos à saúde humana podendo em casos graves aumento dos casos de mortalidade por tais causas (HUIJBREGTS *et al.*, 2016).

- ❖ **Saúde humana – Depleção do ozônio (*endpoint*):** essa categoria relaciona seus dados a partir dos valores presentes na categoria de potencial impacto ambiental “Depleção do Ozônio em nível *midpoint*”, indicando o detrimento da qualidade de vida humana quando prejudicada pelos danos provocados pela depleção do ozônio, sendo eles: desenvolvimento de imunodepressão, desenvolvimento de tumores na pele, catarata, propagação de Dengue e Malária (HUIJBREGTS *et al.*, 2016).

4.3.1.5 PROCESSOS PARA O ICV

Como descrito na seção 3.2.2 e 3.2.1 o mapeamento das atividades para composição do ICV segue os procedimentos indicados na Norma ABNT/ISO 14044-2014, orientado para a abordagem atribucional. A Tabela 15 apresenta os processos considerados para construção do inventário deste modelo genérico

Tabela 15 – Processos considerados para Construção do ICV

Processo	Informações Obtidas	Origem dos Dados
Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	Informações sobre os processos de extração e beneficiamento das matérias primas presentes nos materiais do transformador elétrico de potência.	Dados secundários (genéricos)
Fabricação e Montagem do Transformador de Potência	Informações sobre os processos de fabricação e montagem do transformador elétrico de potência.	Dados primários e secundários.

Transformação e Consumo da Energia Elétrica	Informações sobre o processo de transformação e consumo da energia elétrica, com base nos fluxos presentes na matriz energética brasileira.	Dados primários e secundários.
Produção de Diesel	Informações sobre os processos referente a produção do combustível fóssil utilizado para o processo de transporte.	Dados secundários.
Transporte	Informações sobre o consumo de Diesel para o deslocamento dos insumos e produto	Dados secundários.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Percebe-se que as informações presentes na Tabela JJJ têm em sua maioria a origem de seus dados classificados como dados secundários, dada a dificuldade de coleta de informações *in loco* em empresas especializadas (principalmente dentro do atual cenário pandêmico).

4.3.1.6 INTERPRETAÇÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS ASPECTOS DE ACV PARA DEFINIÇÃO DO MODELO GENÉRICO

A **interpretação** dos dados de ICV (descrita em 3.2.4), que devem ser processados por um *software* de simulação computacional e convertidos em potenciais impactos ambientais setORIZADOS por categoria de impacto ambiental, terá seus resultados apresentados e discutidos no capítulo de aplicação do modelo proposto.

A fronteira no sistema, conforme definida em 3.2.6, em que se especificam as etapas e os fluxos para a composição do modelo (extração dos recursos naturais, beneficiamento da matéria prima, manufatura e consumo de água e eletricidade), será dividida em 3 categorias para inserção no *software* de modelagem computacional: fluxos, recursos e emissões. Ressalta-se que todo o limite geográfico, temporal e tecnológico está restrito às condições estabelecidas na seção 3.2.7.

Na Tabela 16, são apresentadas as unidades de medida consideradas para cada um dos processos de composição do ICV que posteriormente a serem introduzidos no *software* de simulação computacional em: fluxos, recursos e emissões, compondo então o fluxo de referência, função do sistema e unidade funcional (3.2.8), e o sistema de produto (3.2.9).

Tabela 16 – Lista de Unidade de Medida por Processo

Processo	Unidade de Medida
Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	kg e kWh
Fabricação e Montagem do Transformador de Potência	kg e kWh
Transformação e Consumo da Energia Elétrica	kg e kWh
Produção de Diesel	L
Transporte	Km

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

De forma resumida, o Modelo proposto pode ser observado na Figura 54, na qual se observam os Blocos, as Atividades e as Variáveis de Controle com as respectivas Unidades de Medida e as categorias de Avaliação dos potenciais impactos ambientais.

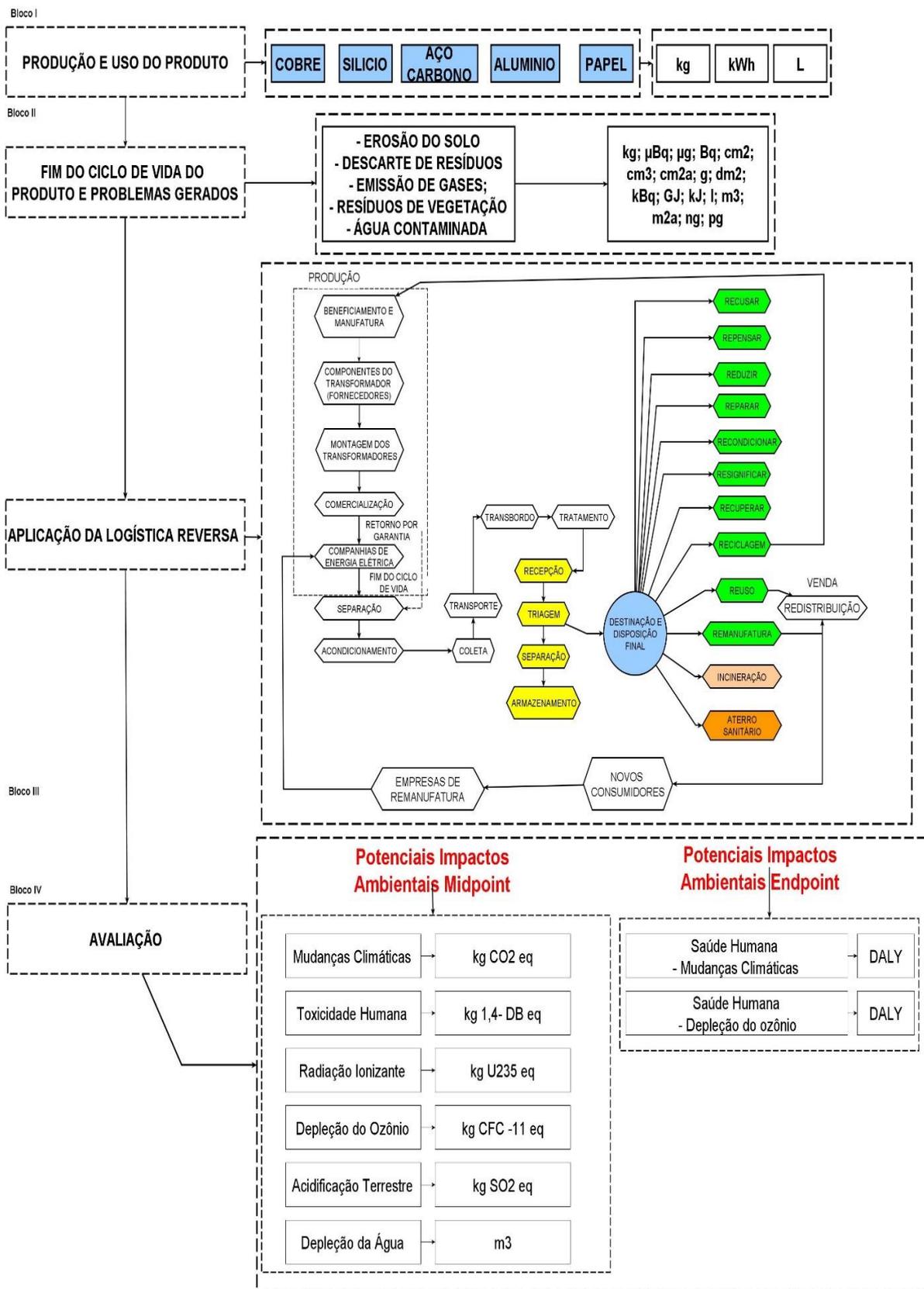


FIGURA 54 – SÍNTESE DO MODELO PROPOSTO E SUAS INFORMAÇÕES.

5. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O presente capítulo consiste na aplicação do modelo proposto, contendo as informações para os quatro blocos apresentados e descritos no Capítulo 4 deste trabalho. Os blocos foram alimentados com dados classificados como primários e secundários, a coleta de dados foi executada em duas empresas utilizadas como estudo de caso, sendo elas: uma empresa receptora de transformadores elétricos de potência especializada em LR uma empresa produtora de transformadores elétricos de potência.

5.1 PRODUÇÃO E USO DOS INSUMOS - BLOCO I

As informações presentes nesse bloco referem-se aos dados dos insumos empregados nas etapas de produção e uso dos dois tipos de transformadores elétricos de potência analisados neste trabalho (10kVA e 30kVA).

A coleta dos dados e análise em campo foi concebida por meio de visitação *in loco* durante o ano de 2018 e acompanhamento dos dados em 2019 para a **empresa receptora de transformadores**. E para a empresa **produtora de transformadores** os dados foram coletados no ano de 2020 por meio de análise documental e entrevistas não estruturadas com *stakeholders* (a visitação não foi permitida para coleta de dados no chão de fábrica devido ao isolamento social em que as atividades manufatureiras foram suspensas).

Ambas as empresas parceiras deste trabalho atuam no mercado atendendo companhias/concessionárias de Estados diferentes em todo o Brasil. As ações executadas durante o processo de coleta de dados foram:

- Coleta de dados primários *in loco*, com base nos procedimentos recomendados pelas Normas ABNT/ISO 14040 e 14044 por meio de observação dos processos, análise documental dos processos, mapear

processos e atividades, entrevistas com os funcionários, aferir a quantidade de massa, aferir o consumo de eletricidade do objeto de estudo e seus componentes realizados nas empresas parceiras deste estudo. Para os dados em que não foram possíveis realizar quantificação e aferição *in loco*, estes foram classificados como dados secundários e obtidos por meio de consulta em bancos de dados nacionais e internacionais relacionados à construção de ICV e ACV, bases de dados computacionais e artigos publicados relacionados ao tema.

- Quantificação do balanço de massa do produto e seus componentes considerando 10 amostras do produto completo. Em seguida efetuar o procedimento de desmontagem e após desmontagem os pesar utilizando dois tipos de balança: balança digital de bancada modelo Pnix-3 para os itens menores (buchas, terminais e isoladores) e balança de plataforma modelo Mic-1000H para os itens maiores (bobinas de cobre, núcleo de silício, carcaça, tampa, resíduos).
- Seleção de 10 produtos de cada tipo, os posicionar cada uma das peças sobre a balança por 3 vezes para registro das informações (balanças monitoradas e calibradas pelo departamento de metrologia da organização tendo como valores de massa referência 1Kg (para o modelo Pnix-3) e 10 Kg (para o modelo Mic-1000H), ambas apresentaram precisão de 0,001g).
- Quantificação do balanço de EE, utilizando instrumentos como: multímetro para coleta da informação de tensão (V) e alicate amperímetro para a coleta da informação da corrente (A), instrumentos certificados com regime de calibração pelo INMETRO.

O processo para coleta de dados foi elaborado com base nos conceitos da ACV, como mostra o diagrama simplificado da Figura 55, que consiste na avaliação do fim de vida do transformador elétrico de potência, analisado a partir do processo de LR dos principais componentes do transformador.

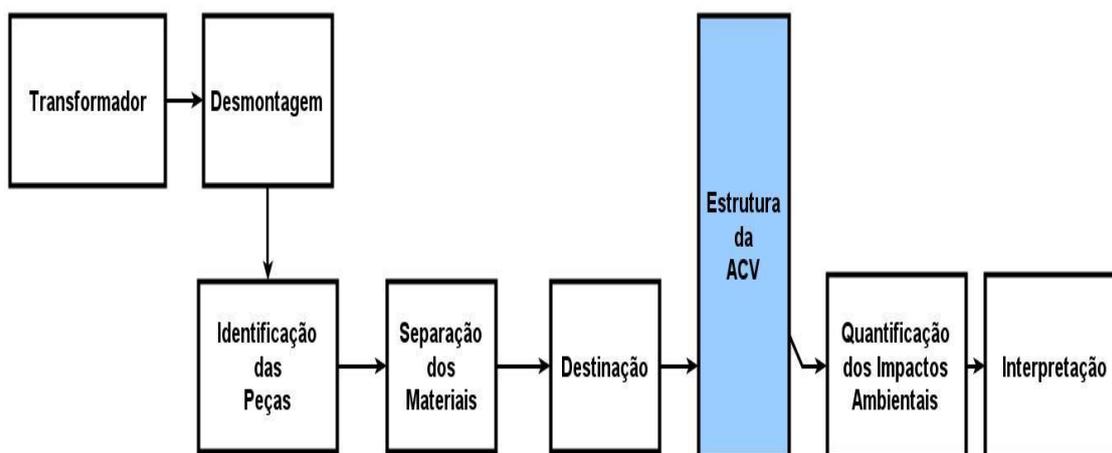


FIGURA 55 – AVALIAÇÃO DO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR.

O protocolo de coleta e compilação de dados, foi estruturado no conjunto de atividades apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9 - Atividades do protocolo de coleta e compilação dos dados.

Atividade	Meio de coleta	Departamento	O que deve ser observado durante a coleta de dados
1 - Identificação dos tipos de transformadores de potência.	Análise de documentos.	Engenharia do produto.	Verificar os tipos de transformadores de potência existentes da planta fabril.
2 - Identificação dos componentes presentes nos transformadores.	Análise de documentos e inspeção visual.	Engenharia de produto.	Verificar as peças presentes no transformador.
3 - Identificação dos processos existentes na planta fabril.	Observação direta.	Todos os departamentos	Quantificar os processos existentes.
4- Mapeamento do processo de LR dos transformadores.	Observação direta.	Departamento de LR e gestão ambiental.	Identificar todas as etapas existentes no processo de LR dos transformadores.
5 -Mapeamento do processo de reforma dos transformadores.	Observação direta.	Departamento de reforma dos transformadores e gestão ambiental.	Identificar todas as etapas existentes no processo de reforma dos transformadores.
6 - Quantificação de massa e tipo de material dos transformadores	Medições <i>in loco</i>	Departamento de gestão ambiental.	Mensurar a quantidade de massa de cada peça presente no transformador e também o tipo de material.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os dados coletados foram registrados e organizados em planilhas para que os mesmos fossem compilados.

Desta maneira os dados de massa foram agrupados por tipo de material, quantificando o quanto de recurso natural foi utilizado desde a sua extração até o seu beneficiamento final, associando ao balanço de energia, quantificação dos resíduos e emissões atmosféricas como ilustra a Figura 56.

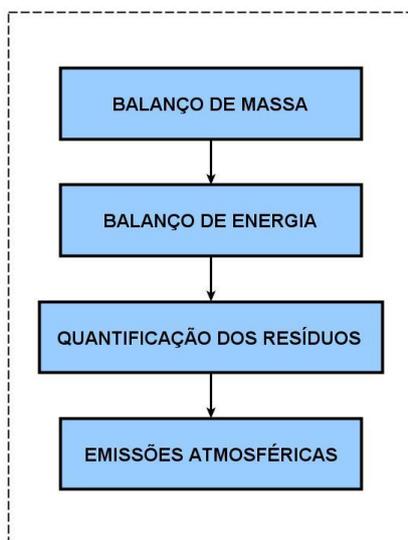


FIGURA 56 – VARIÁVEIS GERAIS DA ACV PARA TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.

As variáveis apresentadas nas Figuras 55 e 56 foram utilizadas como referência para o mapeamento dos processos, inventário do ciclo de vida e ACV.

A construção do presente modelo proposto considerou as seguintes cadeias produtivas: alumínio, aço carbono, cobre, papel e silício. Os valores de referência para a quantidade de massa (por tipo de material) e seu respectivo consumo de energia elétrica são apresentados na Tabela 17 considerados para as principais etapas.

Tabela 17 – Valores de referência para quantidade de massa e consumo de eletricidade (kg/kWh)

Cadeia Produtiva (Material)	Processo	Referência de Massa (kg)	Referência kWh
Alumínio	Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	1	56,94
Aço Carbono	Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	1	22,5
Cobre	Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	1	18,88
Papel	Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	1	14,99
Silício	Extração dos recursos naturais e Beneficiamento	1	35,55

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Dessa forma realizou-se a quantificação do balanço de massa e balanço energético em cada cadeia produtiva e o consumo de eletricidade para montagem dos transformadores, na Tabela 18 são apresentados os dados de massa e consumo de eletricidade por cadeia produtiva e tipo de transformador.

Tabela 18 – Dados de Massa e Consumo de Eletricidade (Bloco I)

Cadeia Produtiva (Material)	Quantidade Consumida (kg)		Eletricidade (kWh)	
	10kVA	30kVA	10kVA	10kVA
Alumínio	1,00	2,50	56,94	146,33
Aço Carbono	25,60	61,00	576,09	1.480,55
Cobre	8,75	22,70	160,48	412,43

Papel	2,75	13,50	40,79	104,83
Silício	34	88,59	1.208,70	3.149,37
Total	72,10	194,70	2.043,00	5.250,49

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A partir da interpretação das informações presentes na Tabela 18 é possível identificar que a cadeia produtiva do silício se destaca pela quantidade de massa empregada na composição do transformador. Para os dados de massa e de consumo energético por cadeia produtiva, se destacam o consumo de silício, com **34kg (para o transformador de 10kVA)** e **88,59kg (para o transformador de 30kVA)** e o consequente consumo de energia elétrica de **1.208,70kWh (para o transformador de 10kVA)** e de **3.149,37kWh (para o transformador de 30kVA)** demandados nas etapas de extração do recurso natural, beneficiamento e manufatura.

A Tabela 19 apresenta o consumo de eletricidade para a montagem dos dois tipos de transformadores.

Tabela 19 – Consumo de eletricidade empregado na montagem dos transformadores

Tipo de Transformador	Eletricidade (kWh)
Transformador de 10 kVA	148,00
Transformador de 30 kVA	275,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim como nos dados presentes na tabela de dados de massa e consumo de eletricidade (Tabela 18), o transformador de 30kVA apresenta maior consumo de eletricidade para sua montagem, sendo necessários 275kWh enquanto para o transformador de 10kVA são necessários 148kWh para sua montagem. Para cada uma das cadeias produtivas foram considerados 10km para a etapa de transporte de insumos e extração dos recursos naturais em cada uma das suas usinas de mineração, não considerando o deslocamento da matéria prima até a

unidade fabril de beneficiamento e processamento da matéria prima. O inventário completo utilizado para inserção dos dados no *software* de simulação computacional *OpenLCA* estão presentes no Apêndice II deste trabalho.

5.2 FIM DO CICLO DE VIDA DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA E PROBLEMAS GERADOS (INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA) - BLOCO II

Neste bloco se consolidam os dados de balanço de massa e os problemas gerados na fase do fim do ciclo de vida dos transformadores elétricos de potência a partir do protocolo definido no Capítulo 3 e informações presentes no Bloco I (bloco anterior).

A Figura 57 apresenta o fluxograma referente ao processo de fim do ciclo de vida dos transformadores monofásicos de 10 kVA, após a etapa de desmontagem; a Tabela 20 mostra a quantificação dos componentes e os respectivos materiais.

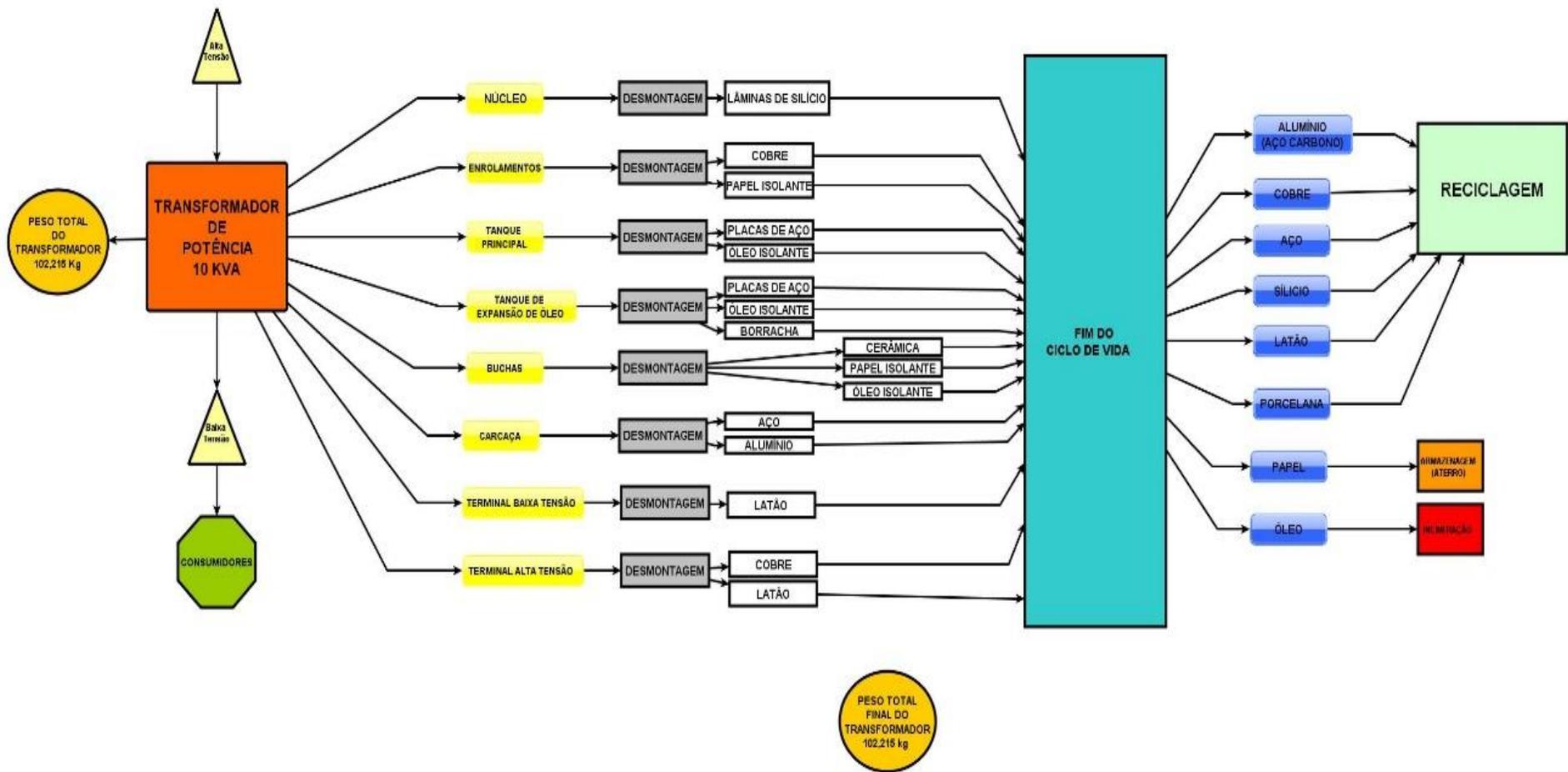


FIGURA 57 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO REFERENTE AO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, 10 KVA.

Tabela 20 - Balanço de massa do transformador monofásico 10kVA

Peça	Tipo de Material	Peso (Kg)	Quantidade	% Em Relação ao Peso
Bobinas	Cobre	8,75	2	8,56
Resíduos Contaminados	Papel	2,75	1	2,69
Núcleo	Silício	34	1	33,26
Buchas	Porcelana	4,5	3	4,40
Carcaça (incluindo a tampa)	Aço Carbono	25,6	1	25,05
Terminal Baixa Tensão	Latão	0,87	3	0,85
Terminal Alta Tensão	Cobre	0,195	3	0,19
Terminal Alta Tensão	Latão	0,79	2	0,77
Isoladores	Porcelana	0,76	6	0,74
Óleo Isolante	Óleo	23	25	22,50
Peças Diversas	Alumínio	1	N	0,98

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao analisar as informações presentes na Figura 41 e Tabela 20, nota-se que o transformador de 10kVA possui 11 tipos de peças e 8 tipos de materiais distintos em sua composição. A Figura 58 ilustra a distribuição percentual com relação à participação de cada um dos materiais empregados na fabricação e montagem do transformador, na qual se observa quais são os componentes que mais incidem em relação ao peso do transformador.

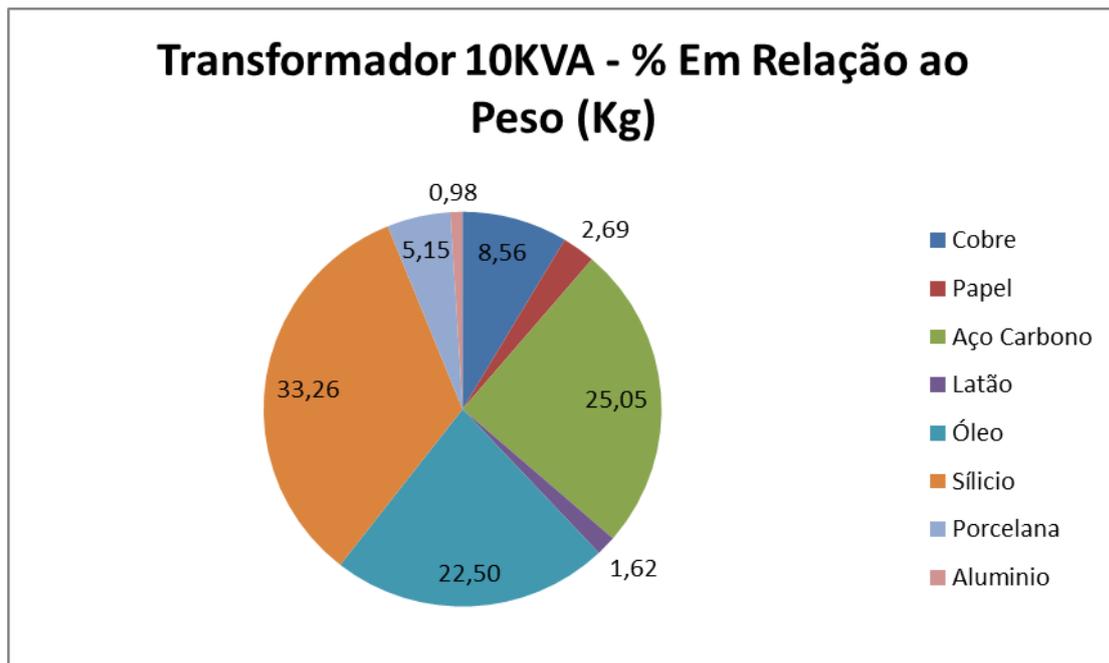


FIGURA 58 – RELAÇÃO PERCENTUAL DOS MATERIAIS PRESENTES NO TRANSFORMADOR DE 10 KVA.

A massa total do transformador monofásico de 10 kVA é de 102,215kg, podendo-se observar que o material com maior participação relativa é o Silício, com 33,26%, seguido pelo Aço Carbono, com 25,05%, e pelo óleo isolante, com 22,50%.

Para o transformador o trifásico de 30 kVA, foi feita a avaliação da mesma maneira que o transformador de 10 kVA. A Figura 59 ilustra o fluxograma simplificado referente ao seu fim de vida.

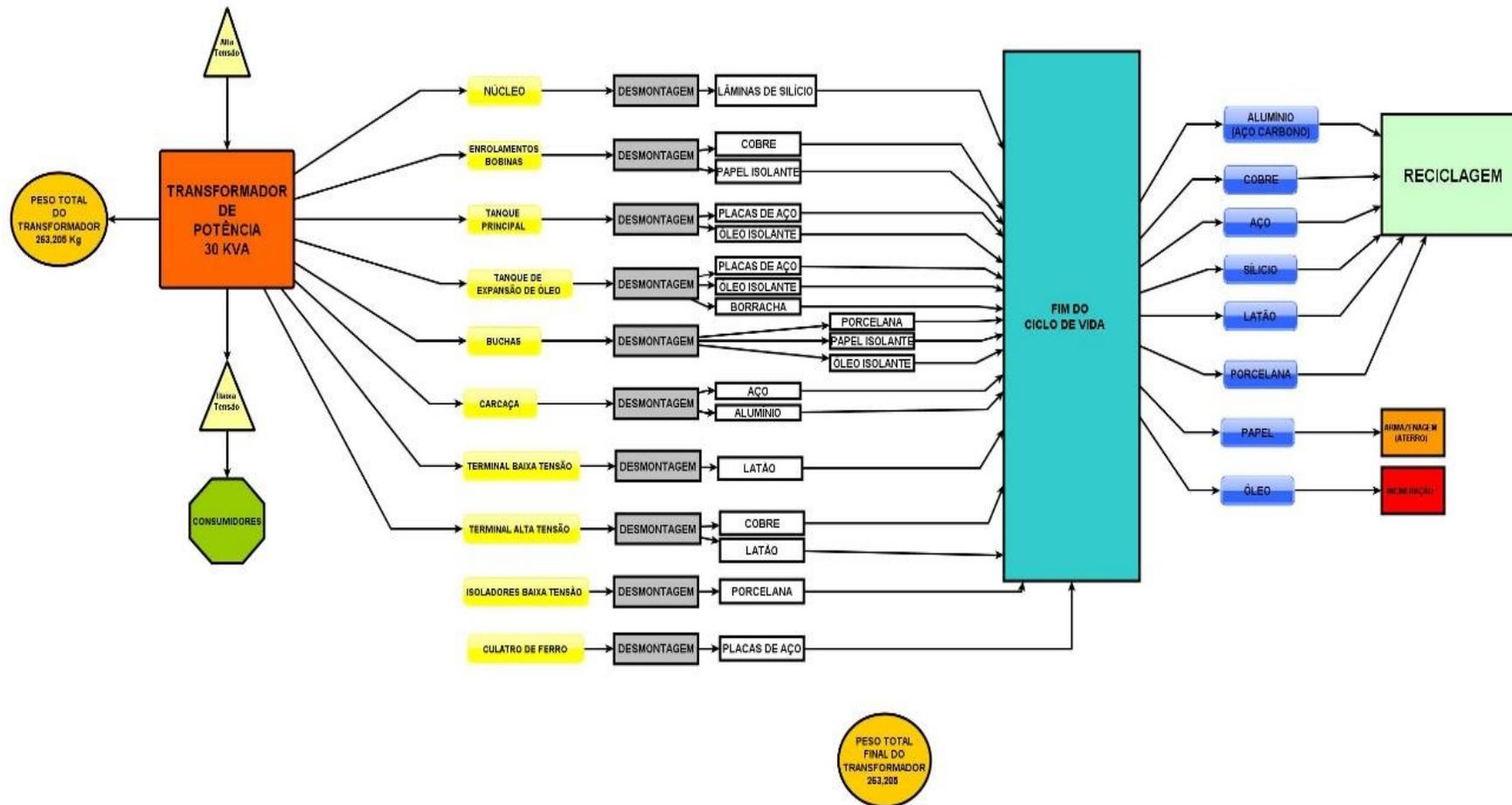


FIGURA 59 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO REFERENTE AO FIM DE VIDA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO, 30KVA.

Tabela 21 mostra o balanço de massa após a desmontagem do transformador de 30 KVA, em que foram encontrados 12 tipos de peças e 8 tipos de materiais diferentes. A Figura 60, apresenta a participação porcentual de cada tipo de material em relação à massa total do transformador, que neste caso é de 260Kg, na qual também se observa quais são os componentes que mais incidem em relação ao peso do transformador.

Tabela 21 - Balanço de massa do transformador trifásico de 30kVA

Peça	Tipo de Material	Peso (Kg)	Quantidade	% Em Relação ao Peso
Bobinas	Cobre	22,5	3	8,55
Resíduos Contaminados	Papel	13,5	1	5,13
Núcleo	Silício	88,59	1	33,66
Buchas	Porcelana	7	3	2,66
Carcaça	Aço Carbono	61	1	23,18
Terminal Baixa Tensão	Latão	1,455	4	0,55
Terminal Alta Tensão	Cobre	0,265	4	0,10
Terminal Alta Tensão	Latão	0,955	5	0,36
Isoladores Baixa Tensão	Porcelana	0,465	4	0,18
Isoladores Baixa Tensão	Porcelana	0,575	4	0,22
Óleo Isolante	Óleo	64,4	70	24,47
Peças diversas	Alumínio	2,5	N	0,95

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

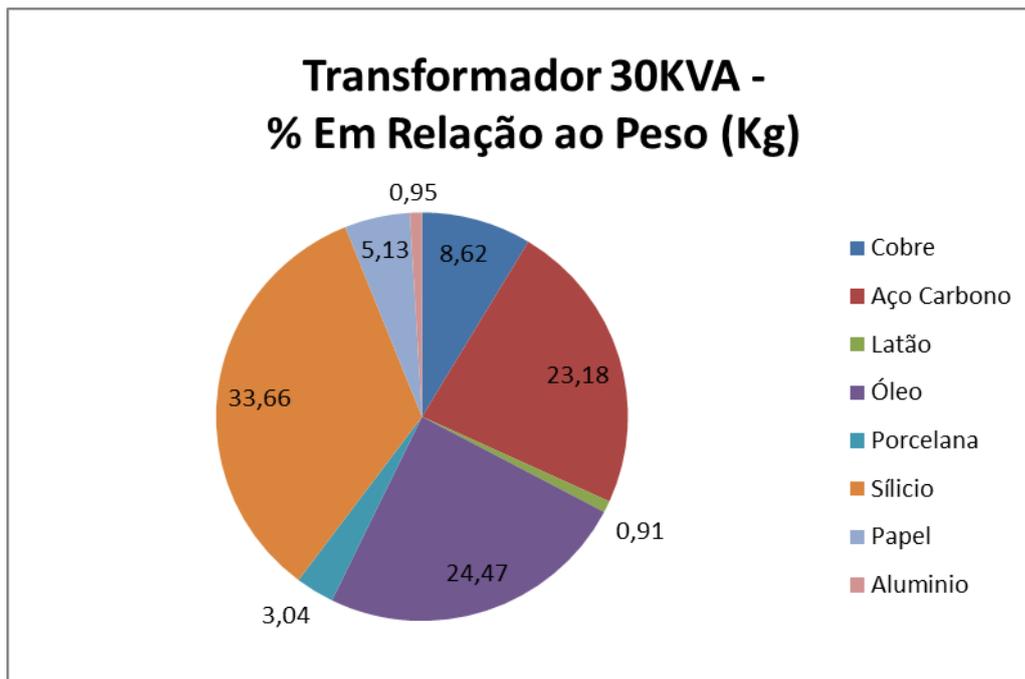


FIGURA 60 - RELAÇÃO PERCENTUAL DOS MATERIAIS PRESENTES NO TRANSFORMADOR DE 30 KVA.

O Silício continuou sendo o material com maior percentual relativo, com 33,66% da massa total do transformador; entretanto, neste caso, o óleo isolante passou a ser o segundo de maior contribuição na massa do transformador, com 24,47%, e o Aço Carbono, com 23,18%, passou a ser o terceiro material com maior contribuição.

Isso mostra que nem sempre há uma relação linear entre as participações percentuais de cada material na massa do transformador e o tamanho do transformador, o que indica a ocorrência de impactos diferentes para cada tamanho de transformador.

Os problemas gerados ao fim do ciclo de vida dos transformadores elétricos de potência descritos nos Capítulo 4 pertencentes a este bloco (Bloco II) são: erosão do solo; descarte de resíduos; poluição hídrica; emissão de gases do efeito estufa e fuligem; e resíduos de vegetação. As tratativas para minimização destes problemas serão apresentadas no Bloco IV de Avaliação.

5.3 APLICAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA - BLOCO III

Neste bloco são apresentadas as propostas de inserção e a aplicação das ações de LR e reciclagem dos materiais para as cadeias produtivas presentes no modelo proposto deste trabalho. Para tanto foi necessário estabelecer fluxogramas para cada um dos tipos de materiais presentes nas cadeias produtivas e o mapeamento dos processos nas duas empresas (produtora e receptora) fonte do estudo de caso.

O mapeamento dos processos foi efetivado em cima das atividades fins: desmontagem dos transformadores no fim do seu ciclo de vida, montagem de transformadores remanufaturados e no processo de produção de transformadores a partir de matéria prima virgem (novos transformadores).

5.1.1 CENÁRIO DE LR E RECICLAGEM DE MATERIAIS

Os cenários de LR e reciclagem dos principais materiais presentes na composição do transformador elétrico de potência foi construído a parti do fluxo apresentado na Figura 52 (Processos do SLR para REE, presente no Capítulo 4): com a inserção das variáveis a serem imputadas como elemento a ser considerado dentro da operação de LR e reciclagem dos matérias. A Figura 61, ilustra o fluxograma com a designação das variáveis.

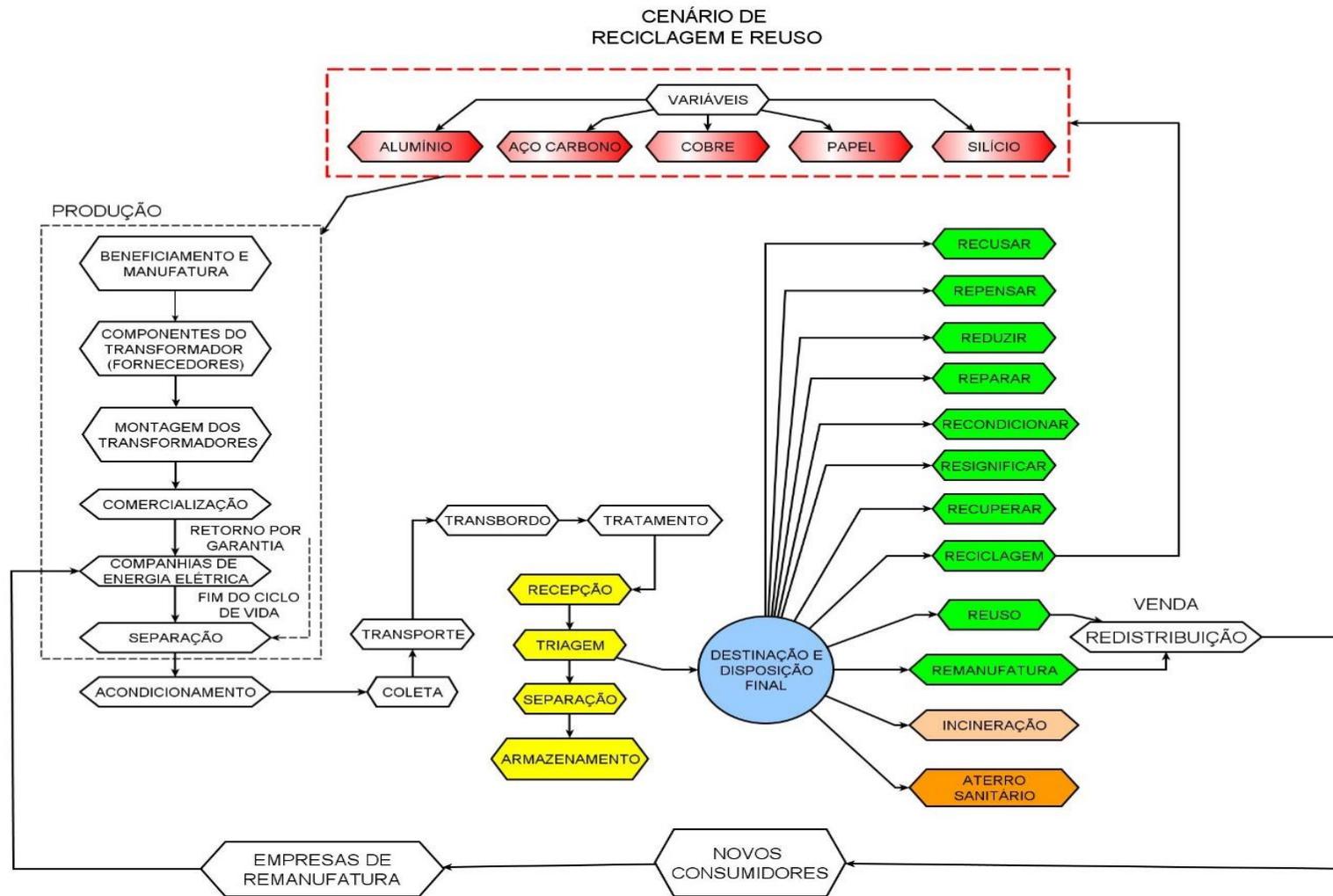


FIGURA 61 – CENÁRIO DE LR E RECICLAGEM PARA OS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

As variáveis do cenário de LR e reciclagem são: alumínio, aço carbono, cobre, papel e o silício; ao submeter essas variáveis ao processo de LR e reciclagem apresentado na Figura 700, é possível estabelecer o percentual de diminuição dos potenciais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida do transformador elétrico de potência.

Nos próximos dois subtópicos são apresentadas as aplicações da LR na reforma dos transformadores elétricos de potência, direcionadas aos processos internos para as empresas do estudo de caso. Para que essas ações aconteçam é necessário observar o seguinte procedimento de desmontagem:

- i) retirada do óleo isolante e sua análise física e química;
- ii) remoção e separação dos componentes/peças;
- iii) avaliação dos componentes/peças, com a finalidade de destinação (descarte, reciclagem ou reuso);
- iv) limpeza dos componentes/peças para destinação final.

Esse procedimento possibilita o mapeamento dos dois processos existentes na empresa, sendo eles: reforma de transformadores e LR de transformadores.

5.1.2 LOGÍSTICA REVERSA DE TRANSFORMADORES (PROCESSOS INTERNOS PARA AS EMPRESAS DO ESTUDO DE CASO)

Neste estudo foram avaliados dois tipos de transformadores elétricos, sendo um monofásico (10 kVA) e outro trifásico (30 kVA). O processo de LR é aplicado nos transformadores de potência em fim de vida é apresentado na Figura 62.

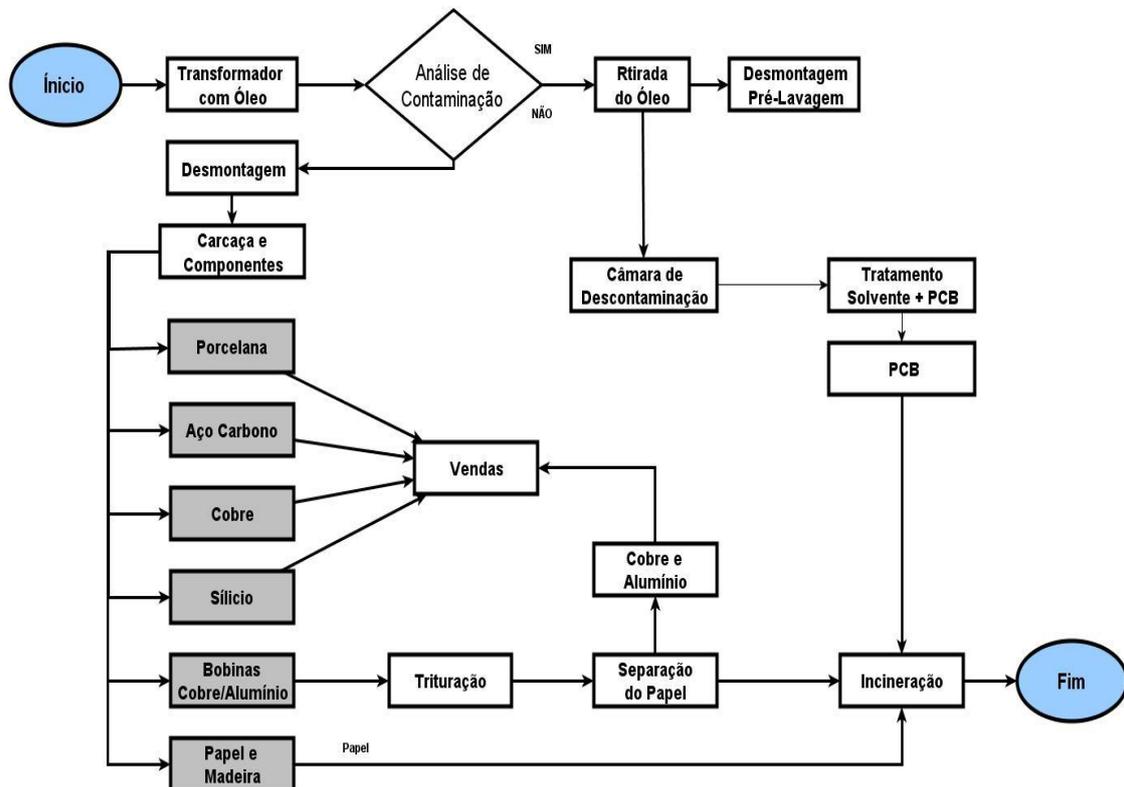


FIGURA 62 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA LR DE TRANSFORMADORES.

Desta forma, os transformadores que não apresentam potencial para reforma são desmontados, com destaque para as principais etapas:

- I. Drenagem do óleo isolante e respectiva análise física e química (em caso de contaminação este transformador é separado dos demais e armazenado em um local específico, para que posteriormente a concessionária faça a retirada do mesmo);
- II. Separação dos componentes/peças, em função do tipo de cada material;
- III. Reciclagem: segundo características de cada material;

- IV. Reuso: encaminhamento de as peças consideradas em bom estado, que ainda podem ser usadas na reforma de transformadores;
- V. Destinação final dos materiais inservíveis segundo legislação ambiental.

5.1.3 REFORMA DE TRANSFORMADORES (PROCESSOS INTERNOS PARA AS EMPRESAS DO ESTUDO DE CASO)

A reforma dos transformadores é feita mediante a demanda das concessionárias de energia elétrica, em que na maioria dos casos corresponde a transformadores que apresentam falhas elétricas, sem avarias na estrutura.

Nesse caso, para que a reforma seja efetivada, é realizada: inspeção e ensaios com as peças, principalmente com o núcleo (cobre, alumínio, silício), isoladores (porcelana), carcaça do transformador (aço carbono) e elementos de fixação.

A reforma dos transformadores é feita com base no reaproveitamento das peças que se encontram apropriadas para uso, por meio do das etapas mostradas na Figura 63, na seguinte sequência:

- I. Limpeza da carcaça do transformador;
- II. Aplicação de pintura de fundo, anticorrosiva;
- III. Isolamento da carcaça, por meio da aplicação de três camadas de tinta, segundo especificações e exigências da concessionária;
- IV. Secagem da camada isolante carcaça;
- V. Montagem do núcleo do transformador, enrolamento e montagem da bobina constituída por cobre ou alumínio;
- VI. Integração núcleo e bobina, isolamento e inspeção;
- VII. Ensaio de condutividade elétrica (em que verifica se a bobina e núcleo estão conduzindo de maneira uniforme, a tensão aplicada no enrolamento verificando se o papel irá resistir, o funcionamento do enrolamento);
- VIII. Secagem do núcleo em estufa;
- IX. Teste final de condutividade e isolação do núcleo;
- X. Retirada da umidade do óleo isolante;
- XI. Inserção do óleo isolante;
- XII. Montagem da tampa do transformador;

- XIII. Montagem das buchas de porcelana;
- XIV. Fechamento da tampa;
- XV. Ensaio elétrico do transformador: tensão de carga, tensão de Sobrecarga, corrente elétrica, potência elétrica;

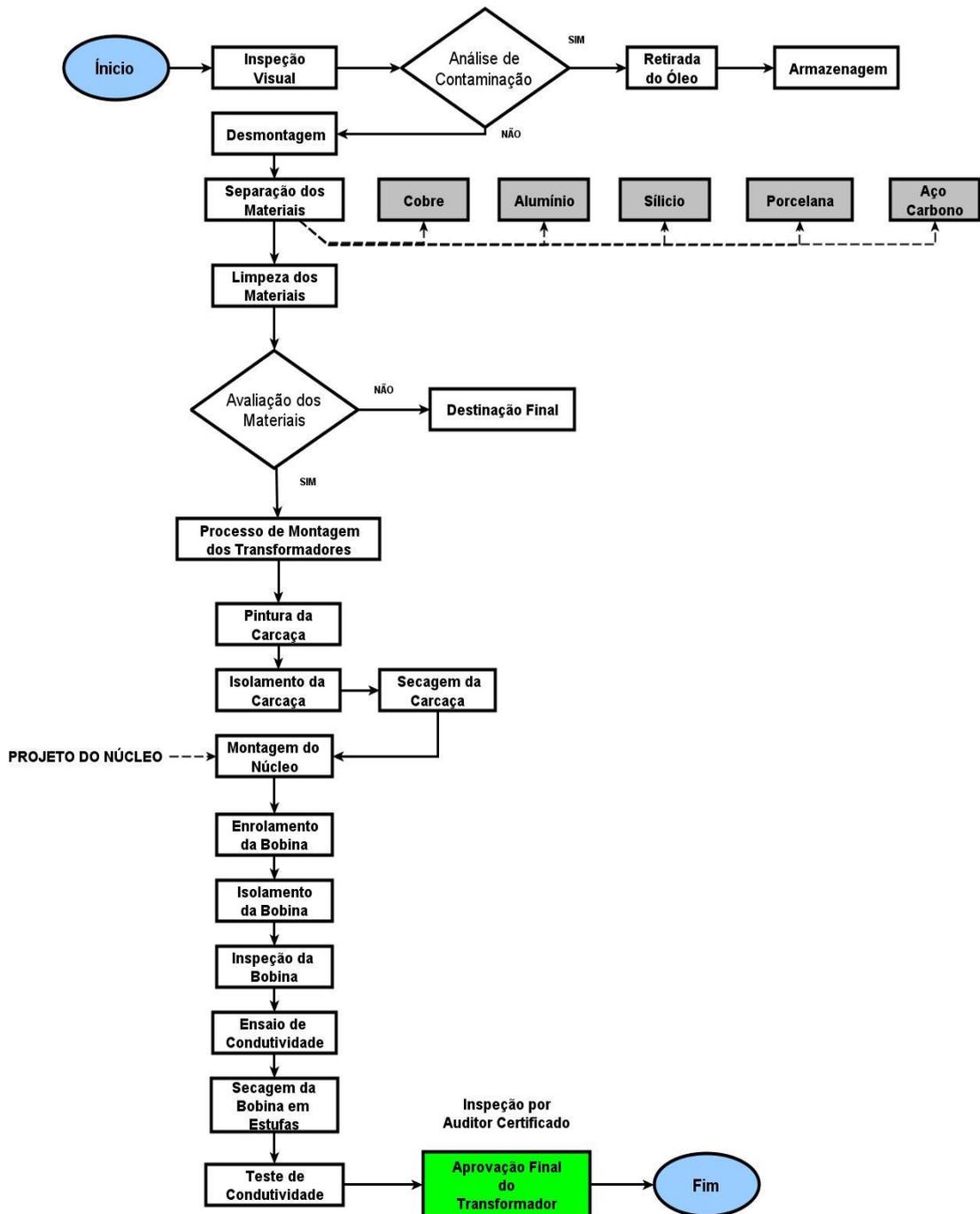


FIGURA 63 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA REFORMA DO TRANSFORMADOR.

Desta forma a reciclagem e reuso dessas cinco variáveis resultam nos dados da ACV sobre o perfil ambiental do produto em análise a ser apresentado no Bloco IV, conforme demonstrado na sequência.

5.3 AVALIAÇÃO – BLOCO IV

Para avaliação e interpretação dos dados coletados, método de avaliação de impactos ambientais *ReCiPe I* (2014) em nível de *midpoint*, considerando 6 potenciais categorias de impacto ambiental foi selecionado, considerando as seguintes potenciais categorias de impacto ambiental: **mudanças climáticas, toxicidade humana, radiação ionizante, depleção do ozônio, acidificação terrestre e depleção da água**. O método *ReCiPe I* (2014) também foi considerado em nível de *endpoint*, neste caso considerando 2 potenciais categorias de impacto ambiental sendo elas: **Saúde Humana - Mudanças Climáticas e Saúde Humana - Depleção do ozônio**

Homogeneizando os dados coletados em campo e os resultados provenientes da AICV após conclusão da etapa de coleta de dados, estes foram inseridos no *software* de modelagem computacional de ACV *OpenLCA*. Para inserção dos dados no *software* de simulação deve ser seguida a seguinte ordem (de acordo com o item 3.2.3 Análise e Avaliação do Impacto e uso da modelagem computacional):

- ✚ Estabelecer se o fluxo criado pertence é referente a um processo de entrada ou de saída;
- ✚ Construção dos processos para cada uma das cadeias produtivas: somar as entradas e saídas que forem iguais quando os fluxos se repetirem; inserir os dados de insumos e emissões respeitando a ação executada na prática (caso real).
- ✚ Construção do sistema de produto para cada uma das cadeias produtivas;
- ✚ Simulação do projeto após a concluir a inserção dos dados

Essa etapa está diretamente relacionada com o cálculo dos potenciais impactos ambientais referente ao produto em análise deste estudo.

5.3.1 RESULTADOS DA ACV

Os resultados da ACV presente neste trabalho são apresentados na seguinte ordem: por categoria de potencial impacto ambiental (separadas em nível de *midpoint* e *endpoint*); por cenários de reciclagem de cada uma das cadeias produtivas presentes na análise gera do produto; por estratégias de minimização dos problemas causados (danos ambientais causados pelas cadeias produtivas).

5.3.1.1 POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS EM NÍVEL *MIDPOINT*, POR CATEGORIA

Os resultados são fruto da inserção dos dados de cada uma das cadeias produtivas consideradas neste trabalho com tendo como referência o balanço de massa e balanço energético das respectivas cadeias produtivas (por tipo de material). Como já mencionado no Capítulo 4 o método de ACV considerado neste estudo foi o método *Recipe* (I) 2014 em nível *Midpoint* configurado dentro dos parâmetros da simulação computacional. O Quadro 10 apresenta as Unidades de Medida utilizadas nas potenciais categorias de impacto ambiental e a Tabela 22, apresenta todas as informações para as 6 potenciais categorias de impacto ambiental consideradas em nível *midpoint*.

Quadro 10 – Descrição das Unidades de Medida.

Unidade de Medida	Descrição
kg CO ₂ eq	Equivalência de emissões em dióxido de carbono.
kg 1,4- DB eq	Equivalência de 1,4-dichlorobenzeno.
kg U235 eq	Urânio 235 equivalente.
kg CFC -11 eq	Triclorofluorometano equivalente.

kg SO ₂ eq	Dióxido de enxofre equivalente.
m ³	Volume de líquido equivalente a mil L.
<i>DALY</i>	<i>Disability Adjusted Life Years</i> – Anos de vida perdidos ajustados por incapacidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Potenciais Impactos ambientais por categoria em nível *midpoint*

Indicador	Transformador 10kVA	Transformador 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	2,79E+12	7,18E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	2,72E+14	6,99E+14	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	1,29E+10	3,31E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	2,62E+04	6,74E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	2,89E+09	7,43E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	2,07E+10	5,33E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Todas as categorias de impacto apresentadas na Tabela 22 influenciam para a piora da qualidade de vida no ecossistema terrestre e a da saúde humana. Elas representam parte do “perfil ambiental” do produto analisado em duas modalidades (transformador elétrico de potência de 10kVA e 30kVA), ressaltando que milhares de unidades de transformadores elétricos de potência são descartadas anualmente em todo o planeta Terra e nem sempre na maioria das vezes esse descarte ocorre de maneira adequada, assim como na maioria dos casos os materiais com potencial de reutilização são direcionados novamente as cadeias de manufatura de novos produtos ou produtos com a remanufatura incorporada .

Cada tipo de transformador elétrico de potência possui uma quantidade total de massa específica considerando as suas características construtivas (peças e componentes), salientando que o transformador elétrico de potência de 10kVA

possui 102,215kg de massa total e o transformador elétrico de potência de 30kVA, 263,205kg de massa total. Conseqüentemente essa diferença na quantidade de massa total de cada um dos transformadores elétricos de potência analisados converteu-se também na diferença de valores presentes em cada uma das categorias de potencial impacto ambiental.

A Figura 64, apresenta os dados referentes à categoria de impacto ambiental **mudanças climáticas**.

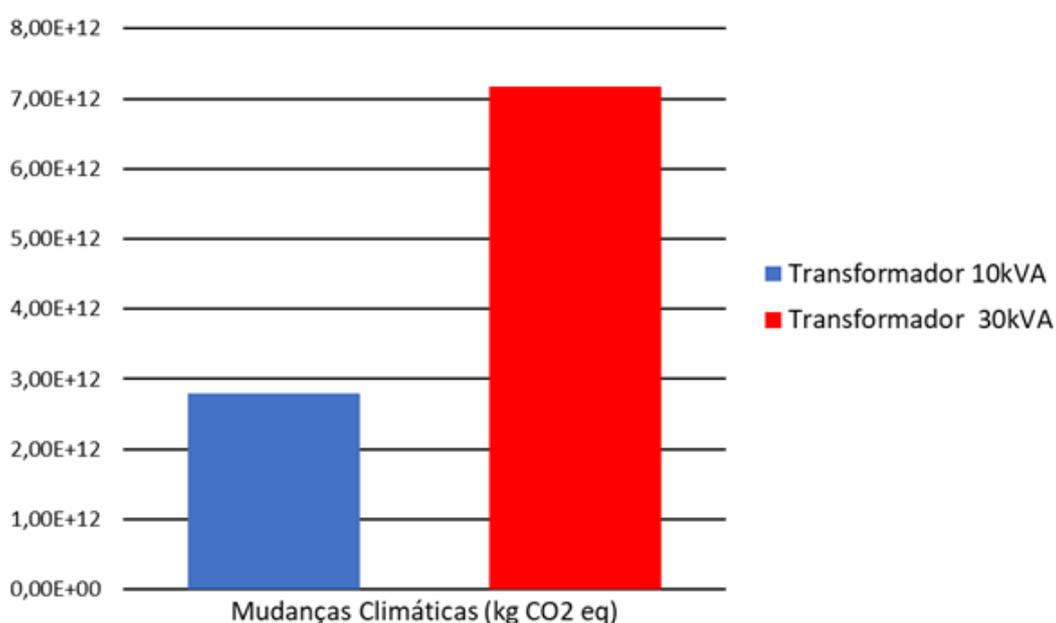


FIGURA 64 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

A categoria de mudanças climáticas apresentou 2,79E+12kg CO₂eq para o transformador de 10kVA e 7,18E+12kg CO₂eq para o transformador de 30kVA. Esta categoria é responsável em apresentar a quantidade kg CO₂eq, que contribui para alterações no planeta Terra, como a alteração da temperatura global, com mudanças nas estações do ano, derretimento das calotas polares e aumento da incidência de eventos aleatórios como tempestades e tsunamis, no ano de 2018 foram emitidas 37 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera, um total de 2,7% da quantidade emitida em 2017.

Outro ponto a destacar a respeito das mudanças climáticas é que, com o aumento da incidência de eventos e fenômenos naturais aleatórios combinados com o aumento da temperatura global do planeta, aumenta-se também a dificuldade de plantio de grãos (milho, soja e arroz), legumes e frutas que garantem o sustento da população mundial uma vez que as tais instabilidades no clima podem interromper o crescimento das lavouras, fator também relacionado às mudanças climáticas e ao avanço da proliferação de insetos, causando a disseminação de doenças e perda de lavouras.

Todos estes pontos, quando analisados, são prejudiciais tanto às comunidades de zonas rurais quanto de zonas urbanas, pois a instabilidade climática em suas ações da natureza não mede disposições geográficas e potenciais zonas de maior influência a vida humana ou animal, e os efeitos tendem a ocorrer de maneira imprevisível, prejudicando a todos na espera de disponibilidade dos recursos naturais, cultivo de alimentos, equilíbrio da fauna e flora dentre outros.

Na Figura 65, estão presentes dos dados relativos à categoria de impacto ambiental **toxicidade humana**.

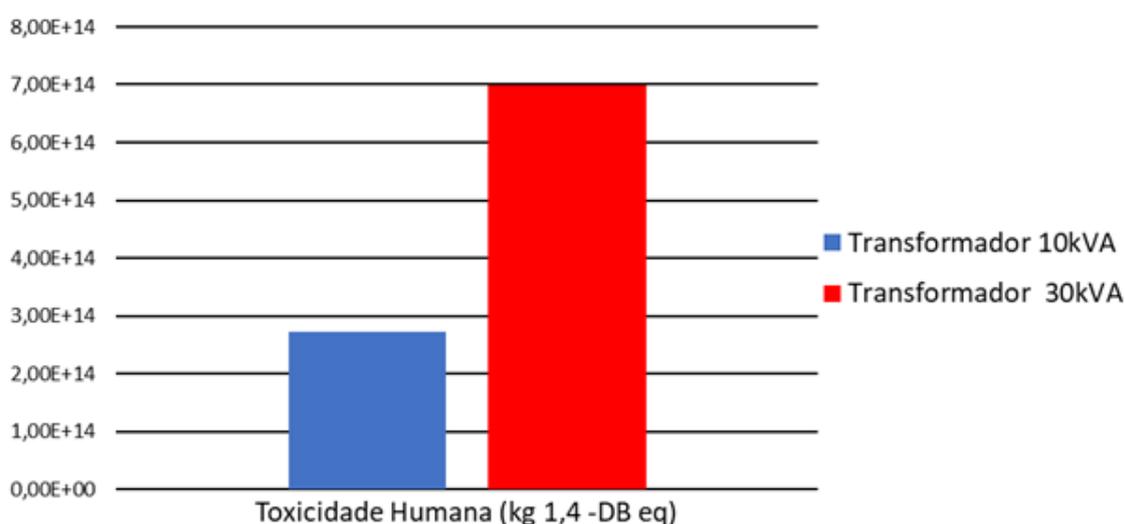


FIGURA 65 – TOXICIDADE HUMANA.

A toxicidade humana calculada foi 2,72E+14kg 1,4-DBeq para o transformador de 10 kVA, e 6,99E+14kg 1,4-DBeq para o transformador de 30kVA. Salienta-se que quando um indivíduo fica exposto a valores acima de 1 kg 1,4-DBeq pode

ter o comprometimento da qualidade da respiração, em função da deterioração do ar ambiente. O detrimento da qualidade do ar impacta diretamente na vida dos seres humanos, dos animais e da vegetação, podendo promover formação de fumaça, fuligem, desenvolvimento de doenças respiratórias que são prejudiciais principalmente para crianças e idosos.

Os efeitos da toxicidade humana para os seres humanos é algo praticamente irreversível ao corpo humano quando exposto a índices constantes da poluição, os agentes químicos presentes nas emissões atmosféricas que debilitam a qualidade do ar. Quando os elementos químicos presentes no ar poluído principalmente em áreas de grandes centros urbanos e polos industrializados são ingeridos podem alterar o comportamento e o desenvolvimento das células no corpo humano, essas anomalias podem causar aos indivíduos o surgimento ou o agravamento de doenças como: rinite crônica, bronquite, asma, fadiga e cansaço físico.

Dada as dificuldades respiratórias ocasionadas pelo acúmulo de substâncias químicas presentes no ar, os indivíduos passam a ficar ainda mais vulneráveis a contrair doenças virais respiratórias, pois já se encontram em um estado clínico defasado por exposição à poluição. FIGURA 66, apresenta os dados de impacto ambiental para a categoria **radiação ionizante**.

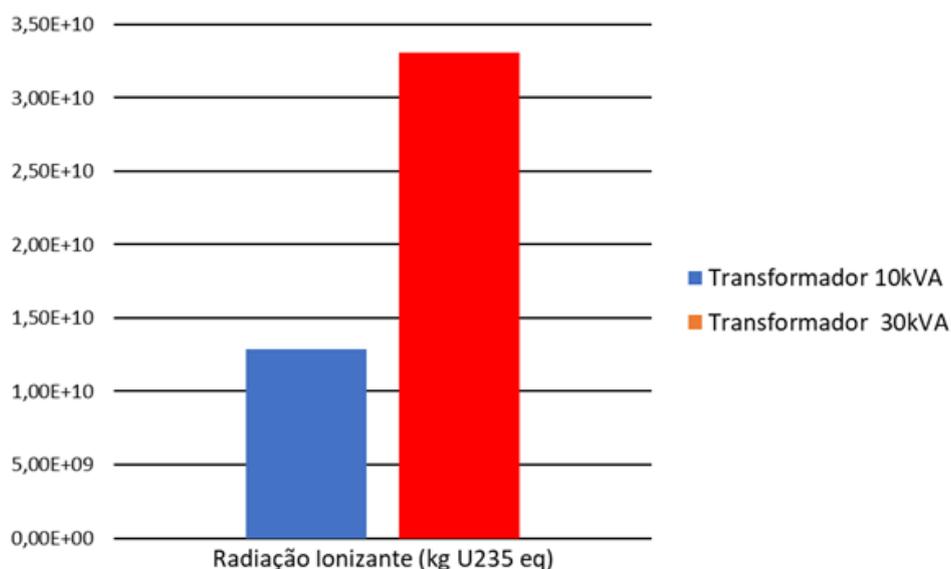


FIGURA 66 – RADIAÇÃO IONIZANTE.

Na categoria radiação ionizante, o transformador de 10kVA apresentou $1,29E+10$ kg U235eq, e o transformador de 30KVA $3,31E+10$ kg U235eq. Quando a radiação ionizante atinge valores acima de 1 kg U235_{eq}, que se manifesta principalmente no ar por meio de ondas eletromagnéticas ou pequenas partículas, ocorre a alteração da estrutura de átomos e moléculas, ocasionando anomalias tanto nas condições biológicas como na produção de alimentos quando expostos a um ambiente ionizado.

A radiação ionizante acumulada nos seres humanos com o passar do tempo de exposição, tem efeito sobre a pele humana, que pode sofrer queimaduras normalmente ocasionadas por radiações do tipo gama. Radiações do tipo alfa e do tipo beta, na maioria das vezes, causam poucos efeitos sobre a pele humana.

Partículas do tipo Gama possuem alto teor de penetração aos tecidos humanos dependendo do período e da quantidade de radiação que o indivíduo se encontra exposto. Essa radiação pode afetar o corpo humano inicialmente pela ionização das moléculas de água no corpo que passam a produzir radicais livres, transformando as moléculas de água (H₂O) em água oxigenada (H₂O₂) e hidrogênio (H₂) induzindo o organismo a condições de oxidação causando modificações nas moléculas do DNA humano. Essas modificações podem ser temporárias ou permanentes.

Como o corpo humano renova constantemente suas células, caso as moléculas do DNA apresentem modificações permanentes o organismo irá trabalhar internamente com seu mecanismo de defesa tentando estabelecer novamente o ponto ótimo de suas funções; caso isso não ocorra, as novas células em desenvolvimento do organismo podem nascer com disfunções ou falhas provando por exemplo o desenvolvimento de células cancerígenas ou paralisação dos rins e do sistema nervoso.

Já na Figura 67, são apresentados os dados para a categoria de potencial impacto ambiental **acidificação terrestre**.

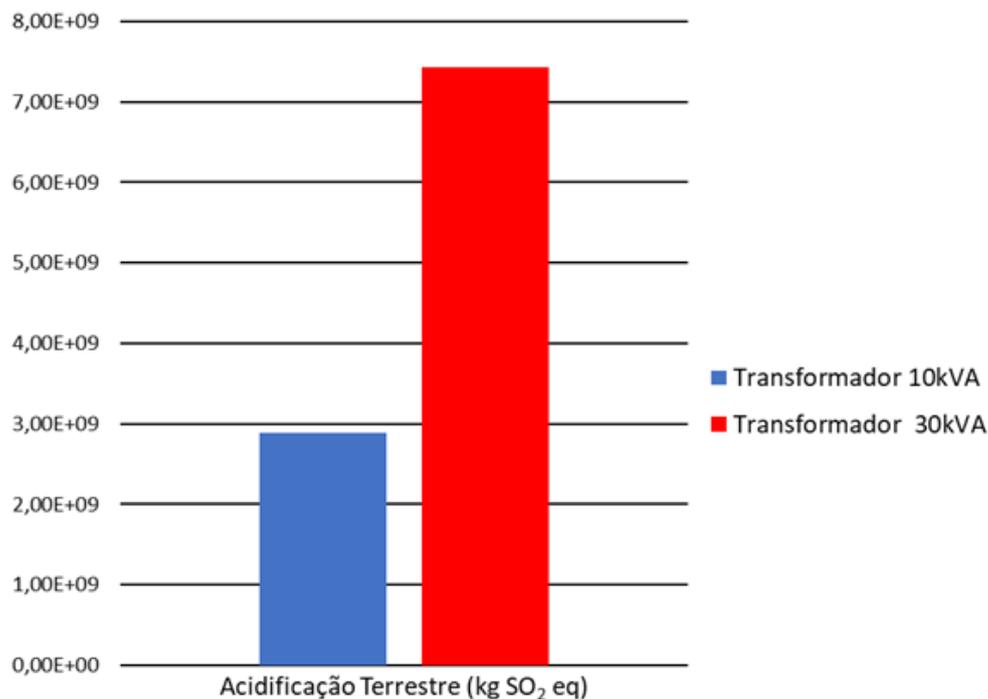


FIGURA 67 – ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE.

A categoria acidificação terrestre apresenta os valores de 2,89E+09kg SO_{2eq} para o transformador de 10kVA e 7,43E+09kg SO_{2eq} para o transformador de 30kVA. No que tange à acidificação terrestre (kg SO_{2eq}), o dióxido de enxofre (SO₂) é um dos principais compostos nesta categoria de impacto, que pode causar chuvas ácidas (precipitações com pH abaixo de 5).

Emissões da indústria de mineração e usinas contendo dióxido de enxofre (SO₂) e oxido de nitrogênio (NO) que ao se dispersarem na atmosfera em contato com outros elementos constituem o elemento ácido (composto por ácido sulfúrico e ácido nítrico) que atingem o solo junto com as moléculas de água provocando problemas como: acidificação de lagos, represas, nascentes e do solo.

A acidificação terrestre pode ocasionar por exemplo alteração do pH do solo, impossibilitando que o cultivo de vegetação, frutas, legumes grãos possam seguir o seu curso natural de desenvolvimento podendo então resultar em produtos de baixa qualidade ou com pouca produtividade do cultivo. A grande quantidade de hidrogênio presente no solo acidificado menos fósforo e outros elementos estarão presentes no solo, sendo o fósforo essencial para o cultivo de plantas.

A Figura 68, apresenta os dados pertencentes à categoria de impacto ambiental **depleção do ozônio**, sendo de 2,62E+04kg CFC-11eq referente ao transformador de 10kVA e 6,74E+04kg CFC-11eq para o transformador de 30kVA. Assim como no caso das mudanças climáticas, a depleção do ozônio também apresenta efeitos diretos no planeta, aumentando por exemplo a incidência dos raios solares UVA e UVB, resultado em disfunções térmicas, alterando o equilíbrio da natureza.

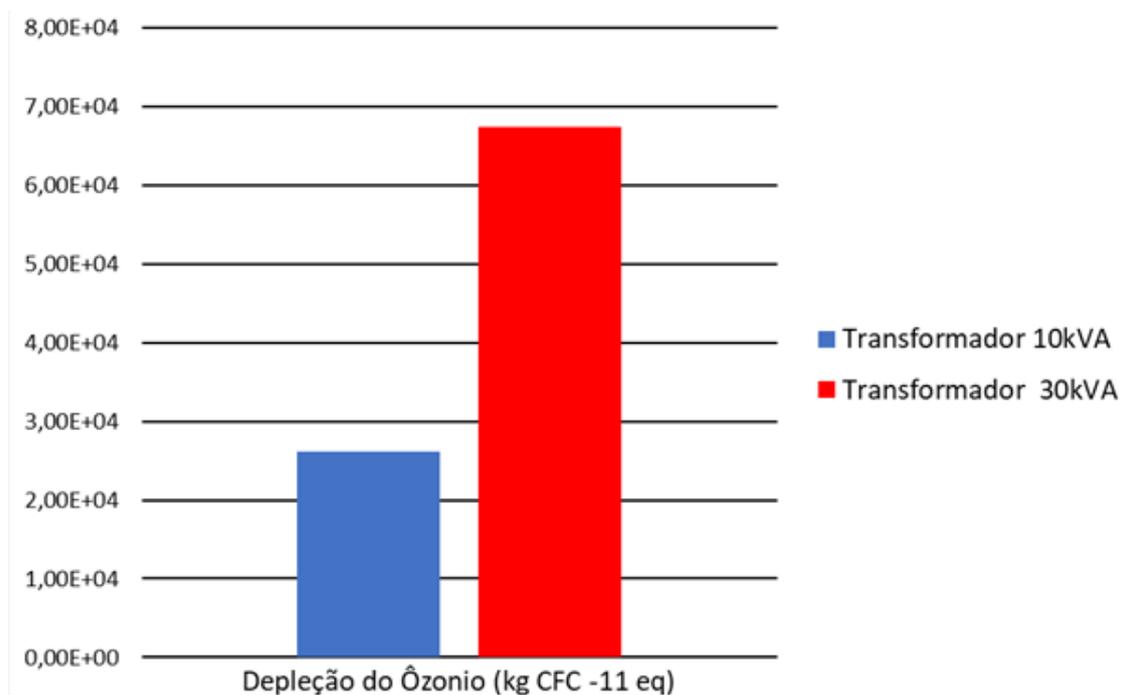


FIGURA 68 – DEPLEÇÃO DO OZÔNIO.

A depleção do ozônio agrava diretamente o derretimento das calotas polares provocando o derretimento de geleiras e conseqüentemente o aumento do nível do mar aumentando o risco de catástrofes, aumentando o número de desabrigados pelo avanço da água, bem como fenômenos naturais de ordem aquática combinados com mudanças climáticas, obrigando populações a praticarem a migração não planejada colocando outras áreas terrestres em ponto de desequilíbrio.

Além da elevação do nível do mar, a depleção do ozônio contribui pejorativamente para alteração da vegetação local, aumento de áreas de

desertificação, poluição do ar, desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, dentre outros problemas.

Os resultados para categoria de impacto ambiental **depleção da água** são ilustrados na Figura 69, em que o transformador de 10 kVA apresentou $2,07E+10m^3$ e o transformador de 30 kVA $5,33E+10m^3$. Com o aumento de itens poluidores a qualidade da água tem se degradado, refletindo-se na perda da quantidade de água potável no mundo, no comprometimento de espécies, na disseminação de contaminantes em outras regiões.

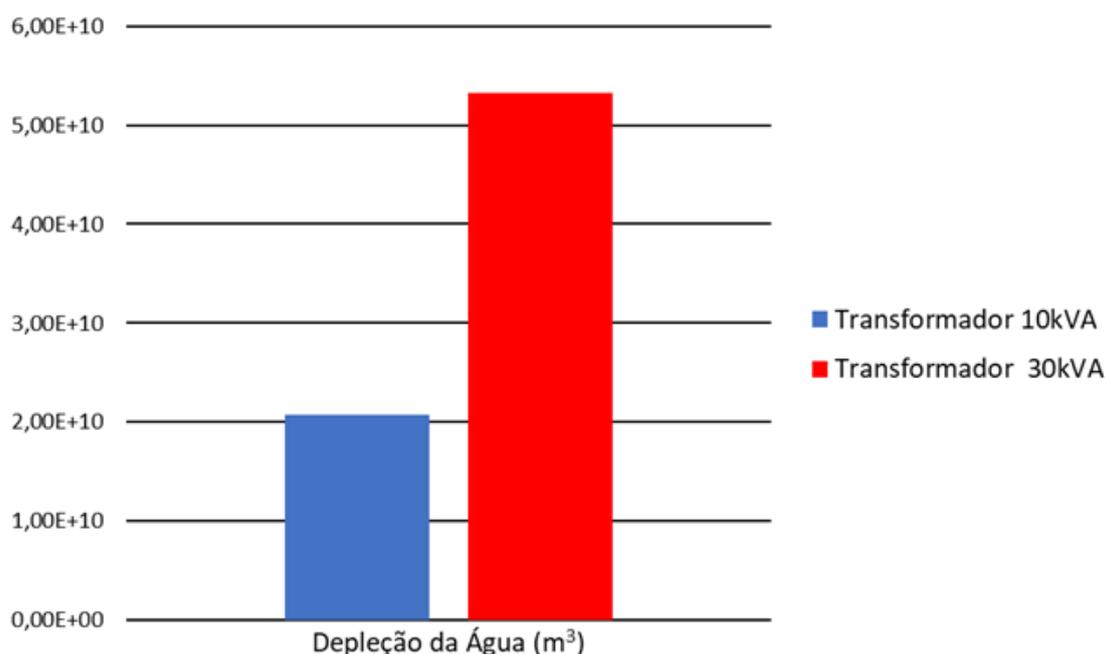


FIGURA 69 – DEPLEÇÃO DA ÁGUA.

A depleção da água, além comprometer o desenvolvimento de espécies aquáticas, pode provocar a disseminação de doenças no curso da água, contaminar nascentes e lençóis freáticos, dificultado o equilíbrio do abastecimento de água para o atendimento da população em suas funções básicas, aumento da mortalidade infantil, empobrecimento da cadeia alimentar base, desempenho de processos produtivos principalmente os relacionados as indústrias farmacêuticas, alimentos e bebidas.

A depleção da água, de forma geral, causa desequilíbrio em todos os pontos de desenvolvimento da vida humana, animal e vegetal, pois sem fontes de água

saudáveis as cadeias produtivas e alimentarem ficam comprometidas do ponto de vista da qualidade em uma reação em cadeia tornando os mecanismos e abastecimento de água potável com custo elevados aumentando por exemplo o consumo de energia elétrica tornando processos e produtos mais caros ao consumidor final, acrescido de um pior desempenho energético e ambiental.

5.3.1.2 POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS EM NÍVEL *ENDPOINT*, POR CATEGORIA

As categorias de potenciais impactos ambientais em nível *endpoint* são calculadas a partir da relação dos dados concebidos em nível de *midpoint*, convergidos em potenciais danos diretos a saúde humana. Os resultados atingidos neste nível encontram-se expressos na Tabela 23.

Tabela 23 - Potenciais Impactos ambientais por categoria em nível *endpoint*

Indicador	Transformador Completo 10kVA	Transformador Completo 30kVA	Unidade
Saúde Humana - Mudanças Climáticas	3,32E+06	8,54E+06	DALY*
Saúde Humana - Depleção do ozônio	1,09E+01	2,80E+01	DALY*

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

**Disability Adjusted Life Years* – Anos de vida perdidos ajustados por incapacidade.

Os dados apresentados na Tabela 604 com relação as 2 potenciais categorias de impacto ambiental são de 3,32E+06DALY para o transformador de 10kVA na categoria de **Saúde humana – Mudanças climáticas** e 8,54E+06DALY para o transformador de 30kVA; já para a categoria de **Saúde humana – Depleção do ozônio** os valores são de 1,09E+01DALY para o transformador de 10kVA e 2,80E+01DALY para o transformador de 30kVA.

Ambas as categorias se referem diretamente sobre a contribuição que o uso de matérias primas virgens, incluindo as etapas de extração dos recursos naturais, beneficiamento da matéria prima até a composição final do produto, traz para o risco de saúde da vida humana, relacionando-se com o efeito de mortalidade e problemas de saúde afetados pela qualidade de vida dos seres humanos oriundos do acúmulo de emissões de processos produtivos de manufatura.

Reafirma-se, neste caso, que mudanças climáticas e depleção do ozônio possuem danos diretos à saúde humana. Propiciam o desenvolvimento de diversas doenças, insuficiências e comorbidades respiratórias e cardiovasculares, além de doenças por exposição à radiação solar, estresse térmico e outras causadas pela exposição a altas temperaturas.

5.3.1.3 CENÁRIOS DE RECICLAGEM E ANÁLISE DA DIMINUIÇÃO DOS POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS EM NÍVEL ENDPOINT, POR CATEGORIA

Explorando o emprego da reciclagem, reuso e os demais Rs (10 no total conforme a Figura 61 presente no Capítulo 4) é notável que o perfil de cada uma das potenciais categorias de impacto ambiental são alterados, pois ao se considerar cada variável (retirar/excluir cada cadeia produtiva/material) do cenário de simulação dos dados das potenciais categorias de impacto ambiental além da quantidade chave de material em questão, são dispensados também os dados referentes ao consumo de energia elétrica empregada para a extração, beneficiamento e produção das peças e componentes com a utilização do material em questão e o consumo de diesel e suas emissões associadas a etapa de transporte.

❖ Cenário de reciclagem do Alumínio

Aplicando a variável alumínio dentro do cenário de reciclagem e reuso a média de redução média dentre as potenciais categorias de impacto ambiental é de 2,269% (Mudanças Climáticas, Radiação Ionizante, Depleção do Ozônio e Acidificação Terrestre com 2,736%; Depleção da Água com 2,671% e Toxicidade Humana não apresentou redução), a Tabela 24 apresenta os resultados para o

cenário de reciclagem do alumínio presente nos transformadores elétricos de 10kVA e 30kVA.

Tabela 24 - Cenário de reciclagem do Alumínio

Indicador	Reciclando Alumínio 10kVA	Reciclando Alumínio 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	2,72E+12	6,98E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	2,72E+14	6,99E+14	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	1,25E+10	3,22E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	2,55E+04	6,55E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	2,81E+09	7,22E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	2,02E+10	5,18E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para o processo de reciclagem do alumínio consome apenas algo em torno de 5% do consumo de energia elétrica empregado no processo de extração da matéria prima, beneficiamento de produção das chapas brutas disponíveis para comercialização e transformação da matéria prima em produto, a reciclagem do alumínio é considerada a maior dentre todas as outras cadeias produtivas.

❖ Cenário de reciclagem do Aço Carbono

Analisando a reciclagem de outra cadeia produtiva, neste caso abordando a cadeia produtiva do aço carbono, os benefícios de reciclagem do aço carbono são a economia dos recursos naturais, consumo de energia elétrica, diminuição da disposição de resíduos em aterros sanitários, diminuição de áreas degradadas pela mineração, estima-se que 65% aço existente no mercado atual já é combinado com ações de reciclagem. Os dados se encontram presentes na Tabela 25.

Tabela 25 - Cenário de reciclagem do Aço Carbono

Indicador	Reciclando Aço Carbono 10kVA	Reciclando Aço Carbono 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	2,02E+12	5,19E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	2,72E+14	6,99E+14	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	9,30E+09	2,39E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	1,90E+04	4,87E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	2,09E+09	5,37E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	1,51E+10	3,89E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A porcentagem média de redução dos valores presentes em cada uma das 6 potenciais categorias de impacto ambiental oriunda da reciclagem do aço carbono é de 22,954% (sendo Mudanças Climáticas 27,682%; Radiação Ionizante 27,673%, Depleção do Ozônio 27,682%; Acidificação Terrestre 27,676%; Depleção da Água 27,010% e Toxicidade Humana não apresentou percentual de redução) para os 2 tipos de transformadores elétricos de potência analisados

❖ Cenário de reciclagem do Cobre

Com relação ao cenário de reciclagem do cobre depois do alumínio ele considerado o segundo material mais procurado para fins de reciclagem dado o seu valor de mercado e seu alto teor de condutividade elétrica. Explorando o cenário de reciclagem do cobre para as quantidades empregadas no transformador elétrico de potência de 10kVA e 30kVA a redução média nas categorias de impacto ambiental é de 23,474% (Mudanças Climáticas 7,712%; Toxicidade Humana 99,997%; Radiação Ionizante 7,736%; Depleção do Ozônio 7,712%; Acidificação Terrestre 7,735% e Depleção da Água com 9,950%) presentes na Tabela 26.

Tabela 26 - Cenário de reciclagem do Cobre

Indicador	Reciclando Cobre 10kVA	Reciclando Cobre 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	2,58E+12	6,63E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	8,53E+09	2,19E+10	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	1,19E+10	3,05E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	2,42E+04	6,22E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	2,67E+09	6,85E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	1,87E+10	4,80E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A reciclagem do cobre permite a diminuição da emissão de dióxido de enxofre, diminuição de 85% do uso da energia elétrica empregada na produção da matéria prima virgem, ressaltando que 100% do cobre pode ser reaproveitado em ações de reciclagem e utilizado em novos ciclos produtivos garantindo suas principais características de condutividade.

❖ Cenário de reciclagem do Papel

Quanto a reciclagem do papel porcentagem de redução dos valores presentes em cada uma das potenciais categorias de impacto ambiental foi de 1,627% (Mudanças Climáticas e Depleção do Ozônio com 1,961%; Radiação Ionizante 1,9675; Acidificação Terrestre 1,960%; Depleção da Água 1,915% e Toxicidade Humana não apresentou redução), como seguem os valores expressos na Tabela 27.

Tabela 27 – Cenário de reciclagem do Papel

Indicador	Reciclando Papel 10kVA	Reciclando Papel 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	2,74E+12	7,04E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	2,72E+14	6,99E+14	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	1,26E+10	3,24E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	2,57E+04	6,60E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	2,83E+09	7,28E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	2,03E+10	5,23E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A cadeia produtiva do papel é considerada a quarta cadeia produtiva com maior índice de emissão de gases do efeito estufa, a produção de 1 tonelada de papel reciclado evita o corte de 17 árvores em fase adulta, consumo de 3 mil litros de água (de um total 5 mil litros para a produção de papel de origem primária), e consome-se 50% a menos de eletricidade.

❖ Cenário de reciclagem do Silício

Tratando sobre a reciclagem do silício, este material apresenta um valor potencial de reciclagem em 90%, do ponto de vista energético reciclar este material permite economizar entre 50% a 70% do consumo de eletricidade quando comparado ao consumo necessário para o beneficiamento da matéria empregado em sua cadeia produtiva. Dentre outros benefícios da reciclagem

do silício se destacam a diminuição de problemas ambientais com relação a sua extração na natureza como: erosão do solo, destruição de dunas, mudança do curso da água, poluição hídrica e o desequilíbrio as áreas marítimas afetando espécies de peixes, corais e vegetação.

Do ponto de vista da saúde humana a reciclagem do material tende a diminuir a proliferação de doenças como silicose e pneumoconiose provocadas pela inalação do material durante as fases de: extração da matéria prima, beneficiamento da matéria prima e transformação da matéria prima em produtos, doenças extremamente prejudiciais à saúde humana. Os valores para as respectivas potenciais categorias de impacto ambiental se encontram presentes na Tabela 28.

Tabela 28 - Cenário de reciclagem do Silício

Indicador	Reciclando Silício 10kVA	Reciclando Silício 30kVA	Unidade
Mudanças Climáticas	1,12E+12	2,88E+12	kg CO ₂ eq
Toxicidade Humana	2,72E+14	6,99E+14	kg 1,4- DB eq
Radiação Ionizante	5,16E+09	1,33E+10	kg U235 eq
Depleção do Ozônio	1,05E+04	2,70E+04	kg CFC -11 eq
Acidificação Terrestre	1,16E+09	2,98E+09	kg SO ₂ eq
Depleção da Água	8,61E+09	2,21E+10	m ³

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim a porcentagem de redução dos valores presentes em cada uma das 6 potenciais categorias de impacto ambiental pela reciclagem do silício com média de redução em 49,676% dentre os valores das potenciais categorias de impacto

ambiental (Mudanças Climáticas 59,910%; Toxicidade Humana 0,002%; Radiação Ionizante 59,889%; Depleção do Ozônio 59,909%; Acidificação Terrestre 59,893% e Depleção da Água com 58,454%).

Em suma os transformadores elétricos de potência analisados neste trabalho apresentam um potencial de reciclagem dos seus materiais em torno de 67,84% para o transformador de 10kVA e 66,40% para o transformador de 30kVA.

Estima-se que cada indivíduo no planeta Terra gera em torno de 1kg de lixo diariamente, no Brasil apenas 3% do que é considerado como resíduo é reaproveitado por indústrias de reciclagem, cerca de 120 bilhões de reais caso os resíduos fossem reciclados em larga escala com relação ao que é depositado em aterros sanitários anualmente. O objetivo da reciclagem é de garantir a sustentabilidade dos recursos naturais, minimizar a quantidade de poluição e emissões causadas pelos ciclos de cadeias produtivas e o acúmulo de resíduos pós consumo de produtos.

5.3.1.4 Estratégias de minimização dos problemas causados

Nesta seção do trabalho são apresentadas as principais estratégias de minimização dos problemas causados ao meio ambiente ocasionados pelas atividades exercidas nas cadeias produtivas que constituem o objeto de estudo deste trabalho.

➤ Erosão do Solo

A erosão do solo é um dos problemas ocasionados principalmente pela extração dos recursos naturais de origem mineral, a Lei Federal nº6.938/81 art. 2º trata que a recuperação da degradação do solo é obrigação constitucional que instituições que explorarem os recursos minerais em território nacional é automaticamente obrigado a recuperar a área degradada conforme orientações técnicas dos órgãos competentes. Pois os recursos minerais quando são extraídos na natureza a forma humana não consegue reestabelecer a restituição deste recurso natural no meio ambiente o que difere da fauna e flora que têm a possibilidade de reprodução e proliferação. O Conselho Nacional do Meio

Ambiente (CONAMA) trata que a recuperação do solo oriunda da degradação deve ter um plano pré estabelecido com relação ao uso do solo, decidir qual será o uso posterior do solo após o período de degradação.

O processo de tratamento do solo deve seguir as seguintes etapas: passa pelas seguintes etapas:

1º - Identificação da situação de degradação: degradado ou muito degradado;

2º - Definir a natureza do uso futuro do solo: social, econômico ou biológico;

3º- Estabelecer a modalidade de adequação do solo:

✚ **Restauração:** após o processo de degradação este procedimento visa aproximar ao máximo possível as condições e características naturais da área (ou região) anteriores ao processo de degradação ocorrer;

✚ **Remediação:** processo de intervir em solo (ou ambiente) degradado afim de cancelar os efeitos pejorativos de uma determinada área (ou região) para os seres vivos presentes nela;

✚ **Reabilitação:** cessar a degradação traçando ações de recuperação do solo pensando o futuro emprego e uso do solo para a superfície em questão. Podendo na maioria das vezes não trazer uma recuperação do ponto de vista de reestabelecimento do ecossistema em sua forma natural e sim na maioria dos casos um uso do ponto de vista socioeconômico, por exemplo: As feridas ou cavas provocadas pela mineração podem por exemplo serem transformadas em áreas de represamento da água proporcionando a modificação do solo para cultivo de espécies aquáticas quando possível;

✚ **Recuperação:** ao cessamento do processo de degradação, atua em ações do uso futuro do solo com a possibilidade de povoar novamente a fauna e flora, sem a determinação de estabelecer as mesmas características ecológicas presentes na área anteriormente ao processo de degradação como suavização do terreno, utilização de bio-mantas, telas vegetais que auxiliam na re-agregação do solo.

4º - Aplicação das técnicas de engenharia ambiental, bioengenharia, revegetação, replantio da flora e atração da fauna e como atividade constantes controlar e monitorar a geografia em adequação.

- ✚ **Bioengenharia:** aplicação de fibras desidratadas de origem vegetal que protegem o solo com a retenção da umidade, ações superficiais de erosão, garantindo o nascimentos de mudas de plantas nativas na área;
- ✚ **Hidrosemeadura:** consiste na aplicação de uma pasta de fertilizantes no solo com sementes, nutrientes essenciais e matéria orgânica para o reestabelecimento das condições normais do solo local;
- ✚ **Transposição de galharia e poleiros artificiais:** aproveitamento de resíduos vegetais formando pontos de residência e descanso para atração da fauna, proliferação de insetos e outros animais da cadeia alimentar.

Todas essas ações contribuem para o intemperismo, ou seja fenômeno natural que consiste no acúmulo de processos biológicos, químicos e físicos com o passar dos anos sobre a superfície da Terra texturizando e moldando as camadas do solo de forma natural.

➤ **Descarte de Resíduos:**

O descarte de resíduos não é algo que afeta apenas as cadeias produtivas da mineração abordadas neste trabalho e sim um problema amplo envolvendo todos os setores da indústria manufatureira, farmacêutica e alimentícia. A Política Nacional de Resíduo Sólidos (PNRS) promulgada pela Lei Federal 12.305/2010, determinou que até o ano de 2014 (feito ainda não concretizado) todos os lixões e áreas impróprias utilizadas como depósito de materiais em situação de pós consumo, deveriam ser extintas e cada uma das prefeituras se responsabilizar pela construção de aterros sanitários com os devidos cuidados e tratamentos dos materiais (principalmente os resíduos contaminados).

As formas mais indicadas para minimização da quantidade de matérias presentes em aterros são: biodigestão anaeróbia, reciclagem e incineração. A

biodigestão anaeróbia é a técnica indicada para o tratamento de resíduos de natureza orgânica, por este motivo não será tratada neste trabalho.

- ✚ Reciclagem: já abordada no presente trabalho traz benefícios como economia do consumo de eletricidade, diminuição da extração dos recursos naturais utilizados como base para matérias primas presentes nas cadeias produtivas, diminuição da emissão de poluentes no solo, ar e na água. Nos dias atuais o conceito de reciclagem engloba-se dentro do conjunto de 10 R's apresentando outras possibilidades para os materiais já existentes em ações como: repensar, reduzir, reparar, recondicionar, ressignificar, recuperar, reusar, recusar e remanufaturar.
- ✚ Incineração: processo considerado como uma alternativa para a diminuição do volume de material descartado (reduzindo entre 50 a 70% a quantidade de material) a ser enviado para aterro sanitários que apresente por exemplo tenha potencial energético a ser utilizado para a geração de energia elétrica muitas vezes essa quantidade de energia elétrica é utilizada para abastecer ilhas de produção da própria empresa geradora do resíduo.

Neste caso, essa estratégia de minimização dos problemas causados converge para o fluxo apresentado no Capítulo 4 em específico na Figura CCCC: Processos do SLR. Porém como as duas empresas fonte do estudo de caso se enquadram geograficamente dentro do território nacional brasileiro o protocolo deve a ser seguido com deve seguir o recomendado pela PNRS (12.305/2020) para o gerenciamento dos resíduos (envolvendo empreendimentos, Estados, Governos e a população):

- 1) **Avaliar e classificar os materiais em situação de pós consumo como: resíduo** (caminho de destinação final: quando existe possibilidade de ações de tratamento) ou **rejeito** (caminho de disposição final: quando não existe possibilidade de ações manuais, químicas ou tecnológicas para tratamento da matéria para recuperação de um estado adequado para reaproveitamento ou quando os processos a serem empregados para recuperação não são economicamente viáveis);

- 2) **Não geração:** evitar o máximo possível a geração de resíduo dentro dos processos produtivos;
- 3) **Redução:** avaliar os processos produtivos e traçar métricas para redução da quantidade de materiais empregados nas atividades produtivas;
- 4) **Reutilização:** reintegrar novamente o produto ao consumidor, bem como as peças e componentes existente na produção de um novo produto ampliando o ciclo de vida do produto;
- 5) **Reciclagem Tratamento:** reaproveitar os materiais indicando um novo caminho para os materiais após seu tratamento;
- 6) **Disposição final adequada:** indicar o caminho correto para o aterro sanitário quando identificado que não existe possibilidade de tratamento do rejeito.

➤ Emissão de Gases do Efeito Estufa e Fuligem

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) possui em sua Resolução nº 491 de Novembro de 2018 um documento que estabelece o Padrão de Qualidade do Ar, bem como a classificação dos poluentes atmosféricos como **poluentes primários:** emissões oriundas de processos industriais depositadas diretamente na atmosfera, principais elementos: Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Enxofre (SO₂), Monóxido de Nitrogênio (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂); **poluentes secundários:** se formam na atmosfera por meio de junções químicas por associação das características do ar em contato com os poluentes primários. sendo eles ácido sulfúrico, ácido nítrico, nitratos, sulfatos, ozônio, etc.

As ações recomendadas para o tratamento e minimização das emissões atmosféricas e formação de fuligem são:

- 1º - Identificação do perfil de emissões atmosféricas da unidade fabril em análise;
- 2º - Definição do tipo de medidas para diminuição dos poluentes a ser seguida, podendo ser:

✚ **Medidas indiretas:** adaptação dos processos produtivos, substituir combustíveis com perfil adequado do conceito de produção mais limpa, diluição e desodorização das substâncias poluentes;

✚ **Medidas diretas:** ações consideradas agressivas aos processos pois atuam com sistemas de retenção química, física ou biológica da emissão dos poluentes em cada uma das atividades produtivas.

3º - Após definição do tipo de medida a ser tomada executar as ações de acordo com o tipo de substância a ser tratada conforme o Quadro 11 a seguir.

Quadro 11 – Ações para o tratamento de Emissões Atmosféricas.

Substância Poluente	Técnica	Finalidade
Material Particulado	Filtragem por tecido	Remover partículas por meio da trama do tecido presente no filtro.
SO _x e Material Particulado	Lavador de Gases	Dissolução dos gases por meio de solução alcalina ou H ₂ O, e filtragem do composto líquido antes do ciclo final de disposição.
NO _x	Pré-aquecimento do ar de combustão	Submeter o ar combustão a um pré aquecimento com o auxílio de trocadores de calor.
NO _x	Redução catalítica seletiva	Reduzir o NO _x em um leito catalítico por meio de solução aquosa em temperatura média de 300°C a 450°C.
Composto Orgânico Volátil (COVs)	Torre de Carvão Ativado	Filtrar o carbono com auxílio do carvão ativado por meio do processo de adsorção.
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S), COVs e Odor	Bio-filtros	Utilização de compostos naturais (casca de madeira) para remoção de partículas de poluentes.
COVs	Condensador	Converter o poluente gasoso em estado líquido recuperando o poluente para que seja reutilizado do processo industrial.

Fonte: Adaptado de CETESB 2017.

➤ Poluição Hídrica

Empresas e indivíduos interferem no ciclo hidrológico toda vez que extraem o recurso na natureza e o devolvem na maioria dos casos sem tratamento prévio a chegar na estação de tratamento do esgoto. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe em sua resolução nº 430/11 as obrigações a serem tomadas pelos geradores de efluentes industriais nos corpos hídricos (nascentes, lagos, rios e mares) que estes efluentes serão inseridos com nível de pH de 5 a 9 e temperatura de até 40°C, e também responsabilizada as empresas e instituições geradoras por danos aos corpos hídricos e seres vivos presentes no meio aquático. Em suma as indicações para o tratamento de efluentes industriais são:

- ✚ Conter sistema de tubulação próprio para os resíduos e rejeitos líquidos
- ✚ Conter sistema separador absoluto de acordo com o teor físico-químico das águas residuais a ir para o tratamento
- ✚ Remoção dos principais poluentes como: substâncias tóxicas, sólidos em suspensão (micro-partículas), matéria orgânica, organismos patogênicos,
- ✚ Tratamento químico;
- ✚ Entregar anualmente ao CONAMA a declaração de carga poluidora.
- ✚ Em caso de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) na própria indústria conter os seguintes processos: **degradação aeróbia** (utilização de microorganismos que utilizam oxigênio pra promover o tratamento) e **tratamento anaeróbio** (microorganismos que degradam a matéria orgânica sem a utilização do oxigênio).

➤ Resíduos de Vegetação

Os resíduos de vegetação estão presentes em diversas cadeias produtivas pois na maioria dos casos áreas são inicialmente degradadas principalmente pela extração inicial da vegetação nativa, para extrair recursos minerais presentes no solo ou como no caso da cadeia produtiva do papel e celulose em que uma

espécie específica de vegetação é utilizada como fonte de matéria prima. Esses resíduos de vegetação também são classificados como resíduos sólidos, porém tais resíduos requerem ações específicas para o seu tratamento e redução da quantidade a ser disposta ou depositada após utilização de sua forma principal nas atividades de manufatura.

As ações devem permear as seguintes iniciativas:

- ✚ Controle do consumo de matéria prima;
- ✚ Uso racional dos recursos: dentro dos processos de extração e beneficiamento da matéria prima;
- ✚ Manutenção periódica nos equipamentos de extração e beneficiamento da matéria prima;
- ✚ Coleta seletiva para os resíduos e rejeitos;

Essas iniciativas contribuem com a diminuição potencial risco de enchentes, poluição do solo, incêndios dentre outros.

6. Conclusão

O modelo de aplicação da ACV a partir do uso da LR visando reduzir os potenciais impactos ambientais no uso de insumos de manufatura para os transformadores elétricos de potência se apresentou adequado para o escopo definido, considerando: o escopo geográfico brasileiro; o tecnológico como sendo empresas do setor público e privado que produzem e utilizam os transformadores elétricos de potência como bens de consumo; o período de 35 anos como ciclo de vida útil do produto (apesar da possibilidade de uso por até 70 anos), que se encontra atualmente inserido dentro do conceito de economia linear para execução das do berço ao túmulo.

Foram utilizados dados dos transformadores recolhidos por uma empresa com sede administrativa no interior do Estado de SP com o pátio de atividades no interior do Estado do Rio de Janeiro, que correspondem em média a 3000 unidades por mês, provenientes de concessionárias de EE, e os resultados para as seis categorias de impacto ambiental (mudanças climáticas, toxicidade humana, radiação ionizante, depleção do ozônio, acidificação terrestre e depleção da água) em nível *midpoint*, e as 2 potenciais categorias de impacto ambiental em nível (saúde humana – mudanças climáticas e saúde humana – depleção do ozônio) *endpoint*, simulados por meio do *software OpenLCA*, mostraram redução significativa quando comparados com outros dados oriundos de produção em larga escala sem recuperação de materiais.

Todos os valores apresentados nas potenciais categorias de impacto ambiental informam e alertam que o acumulado exercício das atividades de extração dos recursos naturais, beneficiamento da matéria prima, produção de equipamentos e descarte inadequado dos resíduos de pós-consumo, comprometem a quantidade de recursos naturais finitos na natureza, aumentam os índices de emissão de poluentes na atmosfera degradando a qualidade do ar, provocando aquecimento global, mudanças climáticas, erosão do solo, poluição hídrica dentre outros problemas. Contabilizar as emissões das categorias apresentadas serve não só para definir o perfil de impacto ambiental do produto, mas também para alertar indústrias, organizações, e a sociedade quanto à quantidade de

emissões de poluentes lançados na atmosfera, e que o consumo de insumos e produtos deve ser realizado de maneira consciente.

Levando em consideração os dados encontrados nas potenciais categorias de impacto ambiental, um SLR em cadeia de *loop* fechado linkado com o conceito de 10Rs, o *framework* desenvolvido para o caso dos transformadores elétricos considerou como variáveis as cadeias produtivas analisadas (aço carbono, alumínio, cobre, papel e silício) com relação a composição do transformador elétrico de potência. Explorando diferentes os cenários de reciclagem e reutilização dos materiais já existentes na composição do transformador elétrico de potência, os dados foram simulados novamente com o intuito de identificar o percentual de redução dos potenciais impactos ambientais quando os materiais já existentes são readmitidos na no ciclo produtivo para a produção de um outro equipamento. Ao se considerar individualmente cada uma das variáveis (cadeias produtivas) no cenário de reciclagem/reuso (10Rs) os percentuais médios de redução identificados foram: alumínio redução média de 2,269%; aço carbono 22,945%; cobre 23,474%; papel 1,627% e o silício 49,676%.

Além do levantamento de dados aplicando o SLR para cada uma das variáveis por meio de simulação computacional também foram indicadas as principais ações mitigatórias para redução do potenciais impactos ambientais pautando-se pela Lei Federal 12.305/2010 que trata sobre a PNRS, CONAMA, Lei Federal nº6.938/81 art. 2º trata que a recuperação da degradação do solo e fluxogramas para remanufatura e LR dos transformadores elétricos de potência.

Com sugestão para trabalhos futuros registra-se a possibilidade da aplicação do presente modelo proposto para outros tipos de transformadores elétricos de potência e outros equipamentos eletro-eletrônicos, com:

- O desenvolvimento e registros de ICVs no banco nacional de dados de ciclo de vida para que estejam disponíveis em comum acesso para empresas, comunidade acadêmica e indivíduos interessados no desenvolvimento de pesquisas no campo da ACV e LR;
- A definição de parâmetros médios específicos para construção de transformadores elétricos de potência e equipamentos que produzem REEE em

geral para obtenção do selo verde de fabricação incluindo ações de reuso e reciclagem (10Rs) nas atividades manufatureiras das empresas e instituições do setor;

- E também o desenvolvimento de uma base de dados específica para utilização em *softwares* de simulação computacional de ACV com o perfil geológico brasileiro normalizando os componentes de acordo com a geografia nacional.

Referências

ABAL. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO**. História do alumínio. São Paulo. 2014. Disponível em:< <http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 19 de abr. 2014.

ABDALLAH, Tarek et al. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 9, p. 4271-4285, 2012.

ABDOLI, Shiva; KARA, Sami; HAUSCHILD, Michael. An investigation into environmental impact of system of systems. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 584-589, 2019.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR. 5356-1: 2007. Transformadores de Potência-Parte, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5370: 1990 - Conectores de cobre para condutores elétricos em sistemas de potência – Especificação, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5380: 1993 - Transformador de potência – Método de ensaio, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5405: 1983 - Materiais isolantes sólidos – Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial - Método de ensaio, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5437: 1984 - Bucha para transformadores sem conservador de óleo - Tensão nominal 1,3 kV - 160 A, 400 A e 800 A - Dimensões – Padronização, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5458: 1986 - Transformador de potência – Terminologia, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5906: 1984 - Chapas finas a quente de aço carbono para estampagem – Especificação, v. 1.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 5915: 1984 - Chapas finas a frio de aço carbono para estampagem – Especificação, v. 1.

ACERO, Aitor P. et al; LCIA methods–Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. **GreenDelta GmbH**, Berlin, Germany, v. 23, 2014.

AGOSTINHO, Feni et al. Sustainability assessment procedure for operations and production processes (SUAPRO). **Science of The Total Environment**, v. 685, p. 1006-1018, 2019.

AGRAWAL, Saurabh; SINGH, Rajesh K.; MURTAZA, Qasim. A literature review and perspectives in reverse logistics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, p. 76-92, 2015.

AHI, Payman; JABER, Mohamad Y.; SEARCY, Cory. A comprehensive multidimensional framework for assessing the performance of sustainable supply chains. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, n. 23-24, p. 10153-10166, 2016.

AHI, Payman; SEARCY, Cory; JABER, Mohamad Y. A quantitative approach for assessing sustainability performance of corporations. **Ecological economics**, v. 152, p. 336-346, 2018.

AHMED, Abdelsalam et al. Environmental life cycle assessment and techno-economic analysis of triboelectric nanogenerators. **Energy & Environmental Science**, v. 10, n. 3, p. 653-671, 2017.

AHMED, M. Daud; SUNDARAM, David. Sustainability modelling and reporting: From roadmap to implementation. **Decision Support Systems**, v. 53, n. 3, p. 611-624, 2012.

AKDOĞAN, M. Şükrü; COŞKUN, Ayşen. Drivers of reverse logistics activities: An empirical investigation. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 58, p. 1640-1649, 2012.

ALAMEREW, Yohannes A.; BRISSAUD, Daniel. Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular

economy: A case study on electric vehicle batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120025, 2020.

ALIXANDRE, DHEFERSON et al. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO MERCADO LIVRE DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO EM UM CENTRO DE EVENTOS. 2019.

ALVALÁ, Plinio et al. Emissão de gases de efeito estufa. **Mudanças climáticas em rede**. p. 231, 2017.

ALVES, A. R.; COUTINHO, A.R. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. **Minerals Engineering** (132) 275-283, 2019.

ALVES, Isabel Cristina Nogueira et al. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose Kraft. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 167-174, 2011.

ANANDA, Jayanath; HERATH, Gamini. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. **Journal of environmental management**, v. 68, n. 4, p. 343-353, 2003.

ANDRADE, M. L. et al. A cadeia produtiva do Cobre: **Panorama Internacional e Nacional**. 1997 Disponível em: <
<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/13441>>. Acesso em 20 de março de 2020.

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Regulação dos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil. Disponível em: <
<http://www.aneel.gov.br/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao>>. Acesso em: 19 de Novembro de 2018.

ARDUIN, R. H., SILVA, F. B., de CASTRO, A. L., VINHAL, L. D., YOSHIDA, O. S., de OLIVEIRA, L. A., & TEIXEIRA, C. E. 2016. Avaliação das novas premissas para contabilização da água do Ecoinvent v3: um estudo para o bloco de concreto.

ARMIJO, A. et al. Eco-Process Engineering System for composition of services to optimize product Life-Cycle (EPES). **Procedia engineering**, v. 132, p. 1081-1088, 2015.

ARVANITOYANNIS, Ioannis S. ISO 14040: life cycle assessment (LCA)– principles and guidelines. **Waste management for the food industries**, p. 97-132, 2008.

AZAPAGIC, Adisa et al. Towards sustainable production and consumption: a novel decision-support framework integrating economic, environmental and social sustainability. **Computers & Chemical Engineering**, v. 91, p. 93-103, 2016.

AZIZ, N. A. et al. Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 282-290, 2016.

BAKSHI, Bhavik R.; GHOSH, Tapajyoti; LEE, Kyuha. Engineering, markets, and human behavior: an essential integration for decisions toward sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 26, p. 164-169, 2019.

BALDASSARRI, Catia et al. Energy and emissions analysis of next generation electrochromic devices. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 170-181, 2016.

BAPPY, Mahathir Mohammad et al. Supply chain sustainability assessment with Dempster-Shafer evidence theory: Implications in cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117771, 2019.

BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula; DA SILVA, Cátia; CARVALHO, Ana. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 2, p. 399-431, 2018.

Base de dados Ecoinvent 2018. Disponível em:

<<https://www.ecoinvent.org/database/database.html>>. Acesso em: 16 de Setembro de 2019.

BECCALI, Marco et al. Life Cycle Assessment performance comparison of small solar thermal cooling systems with conventional plants assisted with photovoltaics. **Energy Procedia**, v. 30, p. 893-903, 2012.

BEILER, Bruno Caride et al. Reverse logistics system analysis of a Brazilian beverage company: An exploratory study. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122624, 2020.

BERNSTEIN, William Z. et al. Incorporating unit manufacturing process models into life cycle assessment workflows. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 364-369, 2019.

BRANDER, M; BURRITT, RL.; CHRIST, KL. Coupling attributional and consequential life cycle assessment: A matter of social responsibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 514-521, 2019.

BUCHERT, Tom et al. **Design and manufacturing of a sustainable pedelec**. 2015.

BUDAK, Ayşenur. Sustainable reverse logistics optimization with triple bottom line approach: An integration of disassembly line balancing. **Journal of Cleaner Production**, p. 122475, 2020.

CABEZAS, Heriberto. **Editorial overview: Energy, environment & sustainability sustainability modeling**. 2019.

CAIADO, Rodrigo Goyannes Gusmão et al. Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency-A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904, 2017.

CALABRESE, Armando et al. Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 139, p. 155-168, 2019.

CAMPOS, Mari Lucia et al. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 2, p. 198-205, 2010.

- CANO-GONZÁLEZ, R. et al. Controlled switching strategies for transformer inrush current reduction: A comparative study. **Electric Power Systems Research**, v. 145, p. 12-18, 2017.
- CARDOSO, José Guilherme da Rocha et al. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. 2011.
- CARVALHO, João Luis Nunes et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.
- CARVALHO, Núbia et al. Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 671-678, 2018.
- CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?**. 2014.
- CAUCHICK, Paulo; MORABITO, Reinaldo; PUREZA, Vi. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. Elsevier, Brasil, 2010.
- CERDAS, Felipe et al. Life cycle assessment of 3D printed products in a distributed manufacturing system. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S80-S93, 2017.
- CHEN, Danfang et al. A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment. **Procedia CIRP**, v. 9, p. 85-90, 2013.
- CHOUDHARY, Kailash; SANGWAN, K. S.; GOYAL, Divyanshu. Environment and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 422-427, 2019.
- CHOWDHURY, Jahedul Islam et al. Reducing industrial energy demand in the UK: A review of energy efficiency technologies and energy saving potential in selected sectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1153-1178, 2018.

COENEN, Jannie; VAN DER HEIJDEN, Rob ECM; VAN RIEL, Allard CR. Understanding approaches to complexity and uncertainty in closed-loop supply chain management: Past findings and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1-13, 2018.

COGO, Neroli Pedro; LEVIEN, Renato; SCHWARZ, Ricardo Altair. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

COSTA, Márcio M. Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço. Rio de Janeiro: **COPPE/UFRJ**, 2002.

COSTA, Ronaldo Silvestre da. Quantificação das emissões de gases de efeito estufa para veículos de coleta de resíduos domiciliares abastecidos com GNV e Diesel-B5 utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV). 2016.

CRESWELL, J.W. **Research design –qualitative, quantitative and mixed methods approaches**. 3.ed. New York: Sage, 2009.

D'AGATA, Antonio; MORI, Kenji. A dynamic linear economy with characteristic-based endogenous technical coefficients. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 23, n. 3, p. 195-204, 2012.

DAL LAGO, Marco; CORTI, Donatella; WELLSANDT, Stefan. Reinterpreting the LCA standard procedure for PSS. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 73-78, 2017.

DAYA, Bechir Ben; NOURELFATH, Mustapha. Sustainability assessment of integrated forest biorefinery implemented in Canadian pulp and paper mills. **International Journal of Production Economics**, v. 214, p. 248-265, 2019.

DE ANDRADE, Aparecido Ribeiro; FELCHAK, Ivo Marcelo. A poluição urbana e o impacto na qualidade da água do Rio das Antas-Irati/PR. **Geoambiente on-line**, n. 12, p. 01-25, 2009.

DELLAMATRICE, Priscila M.; MONTEIRO, Regina TR. Principais aspectos da poluição de rios brasileiros por pesticidas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1296-1301, 2014.

DE MAN, Johannes Cornelis; STRANDHAGEN, Jan Ola. An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models. **Procedia Cirp**, v. 63, p. 721-726, 2017.

DE PÁDUA PIERONI, Marina; PIGOSSO, Daniela CA; MCALOONE, Tim C. Sustainable qualifying criteria for designing circular business models. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 799-804, 2018.

DEL VECCHIO, Robert M. et al. **Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers**, 2010.

DENG, Rong et al. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 532-550, 2019.

DI CAPUA, Giulia; FEMIA, Nicola. Geometric form Factors-Based Power Transformers Design. In: 2018 **15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)**. IEEE, p. 245-248, 2018.

DI CAPUA, Giulia; FEMIA, Nicola. Geometric form Factors-Based Power Transformers Design. In: 2018 **15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)**. IEEE, p. 245-248, 2018.

DORION, Eric Charles Henri; DE ABREU, Marcelo Faoro; SEVERO, Eliana Andrea. A contribuição da logística reversa e dos sistemas de informação na busca pela sustentabilidade ambiental. **Revista de Administração IMED**, v. 1, n. 1, p. 97-122, 2011.

DREYER, Louise Camilla; NIEMANN, Anne Louise; HAUSCHILD, Michael Z. Comparação de três métodos diferentes de LCIA: EDIP97, CML2001 e Eco-

indicador 99. **The international journal of life cycle assessment** , v. 8, n. 4, p. 191-200, 2003.

EDALATPOUR, M. A. et al. Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: A case study in tehran municipality.

Sustainable cities and society, v. 36, p. 286-301, 2018.

EDDY, Douglas C. et al. A normative decision analysis method for the sustainability-based design of products. **Journal of Engineering Design**, v. 24, n. 5, p. 342-362, 2013.

ELKINGTON, John. **Enter the triple bottom line. In: The triple bottom line.** Routledge, 2013. p. 23-38.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados, segmento celulose e papel 2018.

Disponível em:<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/PRODUTO%204_Vpublicacao.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2020.

ESFANDYARI, Alireza et al. A lean based overview on sustainability of printed circuit board production assembly. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 305-310, 2015.

ESKANDARPOUR, **Majid et al. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review.** Omega, v. 54, p. 11-32, 2015.

FAVA, James A. et al. The role of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) in Life Cycle Assessment (LCA) development and application. **In Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment**, p. 39-83. Springer, Dordrecht, 2014.

FAVI, Claudio et al. A software tool for the analysis and management of resource consumptions and environmental impacts of manufacturing plants.

Procedia CIRP, v. 61, n. 1, p. 341-346, 2017.

FAVI, Claudio et al. PLANTLCA: a lifecycle approach to map and characterize resource consumptions and environmental impacts of manufacturing plants.

Procedia CIRP, v. 48, p. 146-151, 2016.

FAVI, Claudio et al. Using engineering documentation to create a data framework for life cycle inventory of welded structures. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 358-363, 2019.

FERREIRA, Jaqueline Chiodi; SIQUEIRA, S. S.; BERGONSO, Verônica Rodrigues. Impactos causados pela fuligem da cana de açúcar. **SIMPÓSIO DE EDUCAÇÃO**, v. 2, 2009.

FERRI, Giovane Lopes; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; RIBEIRO, Glaydston Mattos. Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement. *Waste Management*, v. 40, p. 173-191, 2015.

FILLETI, Remo Augusto Padovezi et al. Productive and environmental performance indicators analysis by a combined LCA hybrid model and real-time manufacturing process monitoring: A grinding unit process application. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 510-523, 2017.

FILLETI, Remo AP et al. Dynamic system for life cycle inventory and impact assessment of manufacturing processes. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 531-536, 2014.

FINKBEINER, Matthias et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. **The international journal of life cycle assessment**, v. 11, n. 2, p. 80-85, 2006.

FRANÇA, Sergio Luiz Braga et al. A Metodologia Produção mais Limpa para a ecoeficiência no desenvolvimento de produto. In: **4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management**. 2010. p. 1425-1434.

FRISCHKNECHT, Rolf et al. Implementation of life cycle impact assessment methods. 2007.

GAO, Tao; SANDBERG, Linn Ingunn C.; JELLE, Bjørn Petter. Nano insulation materials: Synthesis and life cycle assessment. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 490-495, 2014.

GARDNER, Haley et al. Materials life cycle assessment of a living building. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 458-463, 2019.

GARGIULO, Alessia; GIRARDI, Pierpaolo; TEMPORELLI, Andrea. LCA of electricity networks: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 10, p. 1502-1513, 2017.

GEAR, Matthew et al. A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes—A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste. **Journal of cleaner production**, v. 180, p. 735-747, 2018.

GEBISA, Aboma Wagari; LEMU, Hirpa G. Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 724-731, 2017.

GERMANI, Michele et al. A method for the estimation of the economic and ecological sustainability of production lines. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 147-152, 2014.

GIANNETTI, Biagio F. et al. Five sector sustainability model: A proposal for assessing sustainability of production systems. **Ecological Modelling**, v. 406, p. 98-108, 2019.

GOLINSKA, Paulina; KUEBLER, Frank. The method for assessment of the sustainability maturity in remanufacturing companies. **Procedia Cirp**, v. 15, p. 201-206, 2014.

GONZÁLEZ-VAL, R; PUEYO, F. Natural resources, economic growth and geography. **Economic Modelling**, 2019.

GRÜNEBAUM, Timm et al. Towards sustainable production: a methodology to assess influences between life cycle phases in tool manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 376-381, 2019.

GU, Baihe et al. CO2 emission reduction potential in China's electricity sector: scenario analysis based on LMDI decomposition. **Energy Procedia**, v. 75, p. 2436-2447, 2015.

GUERRA, Antonio José Teixeira. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de geografia**, v. 16, p. 32-37, 2005.

GUINÉE, Jeroen B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The international journal of life cycle assessment**, v 7, nº 5, p. 311, 2002.

HAUPT, Melanie; KÄGI, Thomas; HELLWEG, Stefanie. Avaliação modular do ciclo de vida da gestão de resíduos sólidos urbanos. **Gestão de resíduos**, v. 79, p. 815-827, 2018.

HAUSCHILD, Michael Zwicky. Better–But is it good enough? On the need to consider both eco-efficiency and eco-effectiveness to gauge industrial sustainability. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 1-7, 2015.

HEGAB, H. A.; DARRAS, B.; KISHAWY, H. A. Towards sustainability assessment of machining processes. **Journal of cleaner production**, v. 170, p. 694-703, 2018.

HEIKKURINEN, Pasi; YOUNG, C. William; MORGAN, Elizabeth. Business for sustainable change: Extending eco-efficiency and eco-sufficiency strategies to consumers. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 656-664, 2019.

HEINEMANN, Tim et al. Hierarchical evaluation of environmental impacts from manufacturing system and machine perspective. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 141-146, 2014.

HELLENO, André Luís; DE MORAES, Aroldo José Isaias; SIMON, Alexandre Tadeu. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. **Journal of cleaner production**, v. 153, p. 405-416, 2017.

HUIJBREGTS, Mark AJ et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138-147, 2017.

IDALBERTO, Chiavenato. **Recursos humanos, o capital humano das organizações**. Rio de Janeiro. Editora Elsevier.-2009, 2009.

IFAEI, Pouya; YOO, ChangKyoo. The compatibility of controlled power plants with self-sustainable models using a hybrid input/output and water-energy-carbon nexus analysis for climate change adaptation. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 753-777, 2019.

Industry and the Environment. Resources, Conservation and Recycling, 35. 61-76, 2002.

INGARAO, G.; DI LORENZO, R.; MICARI, F. Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 4, p. 337-347, 2011.

Instituto Brasileiro e Mineração – IBRAM. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira 2012 6ª Edição. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>> Acesso em: 13 de Março de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Electricity Consumption 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/electricity/>>. Acesso em: 06 de Maio de 2019.

ISO 14040 - International Standard Organization 14040. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework, 1997.

ISO, ISO. TR 14049: 2012 - Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - exemplos ilustrativos de como aplicar a ISO 14044 à definição de objetivos e escopos e à análise de inventário. Organização Padrão Internacional , 2012.

JAGHBEER, Yasmine et al. Exploration of simulation-driven support tools for sustainable product development. In: **9th CIRP Conference on Industrial Product/Service-Systems (IPSS)**, Copenhagen. Elsevier, 2017. p. 271-276.

JAUNICH, Megan Kramer et al. Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104841, 2020.

JESUS, Urania; RABBANI, Roberto Muhájir Rahnemay; FARIA, Lina. A Educação Ambiental como instrumento na formação de agentes comunitários de

saúde e de endemias no combate às arboviroses causadas pelos resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira De Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 15, n. 7, p. 206-223, 2020.

JESWIET, J. et al. Energy use in premanufacture (mining). **Procedia CIRP**, v. 29, p. 816-821, 2015.

JESWIET, J. Including Towards Sustainable Mining in evaluating mining impacts. **Procedia CIRP**, v. 62, p. 494-499, 2017.

JIA, Shuwei. Et al. Traffic and emissions impact of the combination scenarios of air pollution charging fee and subsidy. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

JIN, Enze; MENDIS, Gamini P.; SUTHERLAND, John W. Integrated sustainability assessment for a bioenergy system: A system dynamics model of switchgrass for cellulosic ethanol production in the US midwest. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 503-520, 2019.

JIN, S. W. et al. Analyzing the performance of clean development mechanism for electric power systems under uncertain environment. **Renewable Energy**, v. 123, p. 382-397, 2018.

JORGE, Raquel Santos; HAWKINS, Troy R.; HERTWICH, Edgar G. Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1: power lines and cables. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 9-15, 2012.

JORGE, Raquel Santos; HAWKINS, Troy R.; HERTWICH, Edgar G. Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 2: transformers and substation equipment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 184-191, 2012.

JULIANELLI, Vivianne et al. Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 158, p. 104784, 2020.

JUNIOR, Luiz Moreira Coelho; MARTINS, Kalyne De Lourdes Da Costa; VIEIRA, Yuri Rommel. Emissões de co2 geradas pela lenha consumida no nordeste

brasileiro: uma análise pelo critério recipe (midpoint). In: **anais do ii congresso internacional de biomassa**. p. 2, 2017

KALKANIS, K. et al. Wind turbine blade composite materials-End of life treatment methods. **Energy Procedia**, v. 157, p. 1136-1143, 2019.

KALUZA, Alexander et al. Concurrent design & life cycle engineering in automotive lightweight component development. **Procedia Cirp**, v. 66, p. 16-21, 2017.

KALVAKALA, Krishna C.; KATTA, Viswanath R.; AGGARWAL, Suresh K. Soot emission reduction in oxygenated co-flow jet flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2020.

KASPAR, Jerome; VIELHABER, Michael. Sustainable lightweight design—relevance and impact on the product development & lifecycle process. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 409-416, 2017.

KEIVANPOUR, S.; KADI, D. Ait. An integrated approach to analysis and modeling of End of Life phase of the complex products. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1892-1897, 2016.

KELLENS, Karel et al. Environmental impact reduction in discrete manufacturing: examples for non-conventional processes. **Procedia CIRP**, v. 6, p. 27-34, 2013.

KENNÉ, Jean-Pierre; DEJAX, Pierre; GHARBI, Ali. Production planning of a hybrid manufacturing—remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 135, n. 1, p. 81-93, 2012.

KETPRAPAKORN, Nuttasorn. Toward an Asian corporate sustainability model: An integrative review. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117995, 2019.

KIRCHHOFF, Volker WJH. Geoquímica da média e baixa atmosfera: impactos ambientais por deterioração da camada de ozônio. **Geochimica Brasiliensis**, v. 1, n. 2, p. 41-52, 2011.

KOBAYASHI, Hideki. et al. A simulation methodology for a system of product life cycle systems. **Advanced Engineering Informatics**, v. 36 p.101-111, 2018.

KOREN, Yoram et al. Sustainable living factories for next generation manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 26, 2018.

KOSACKA-OLEJNIK, M. How manage waste from End-of-Life Vehicles?-method proposal. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 1733-1737, 2019.

KULATUNGA, A. K. et al. Sustainable manufacturing based decision support model for product design and development process. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 87-92, 2015.

KUMAR, Mr Amit et al. Life cycle assessment of wireless bts to reduce carbon footprints. **Energy Procedia**, v. 52, p. 120-125, 2014.

LEE, Ju Yeon; KANG, Hyung Seok; DO NOH, Sang. MAS2: an integrated modeling and simulation-based life cycle evaluation approach for sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner production**, v. 66, p. 146-163, 2014.

LOPES, Mariana de Araújo. **Gerenciamento de resíduos madeireiros em pequenas indústrias de produtos de madeira de maior valor agregado**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LU, Bin et al. Reusability based on life cycle sustainability assessment: Case study on WEEE. **Procedia Cirp**, v. 15, p. 473-478, 2014.

LUGLIETTI, Rossella et al. Life cycle assessment tool in product development: environmental requirements in decision making process. **Procedia Cirp**, v. 40, p. 202-208, 2016.

LUÍS, Sofia Cristina Laia. **Comparação de métodos de agregação de indicadores de poluição para ACV**. 2017. Tese de Doutorado – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

LUMSAKUL, Pasuree; SHELDRIK, Leila; RAHIMIFARD, Shahin. The sustainable co-design of products and production systems. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 854-861, 2018.

MAGIO, G.; CACCIOLA, G. When will oil, natural gas, and coal peak?. **Fuel**, v. 98, p. 111-123, 2012.

MAHMOUDI, Sajjad et al. End-of-life photovoltaic modules: a systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 1-16, 2019.

MANICKAM, Parthiban; DURAISAMY, Gopalakrishnan. 3Rs and circular economy. In: **Circular Economy in Textiles and Apparel**. Woodhead Publishing, 2019. p. 77-93.

MANZO, Stefano; SALLING, Kim Bang. Integrating life-cycle assessment into transport cost-benefit analysis. In: **6th Transport Research Arena**. Elsevier, 2016. p. 273-282.

MARCONI, Marco et al. An approach to favor industrial symbiosis: the case of waste electrical and electronic equipment. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 502-509, 2018.

MARDANI, Abbas et al. A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1298-1322, 2017.

MATSUDA, Michiko; KIMURA, Fumihiko. Usage of a digital eco-factory for green production preparation. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 181-186, 2013.

MAWSON, Victoria Jayne; HUGHES, Ben Richard. The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 51, p. 95-105, 2019.

MAYYAS, Ahmad et al. Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 4, p. 1845-1862, 2012.

MAYYAS, Ahmad T. et al. Quantifiable measures of sustainability: a case study of materials selection for eco-lightweight auto-bodies. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 177-189, 2013.

MAYYAS, Ahmad T.; MAYYAS, A. R.; OMAR, M. Sustainable lightweight vehicle design: a case study in Eco-Material selection for Body-In-White. In: **Lightweight Composite Structures in Transport. Woodhead Publishing**, 2016. p. 267-302.

MELLO, Carlos Henrique Pereira et al. Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. **Production**, v. 22, n. 1, p. 1-13, 2012.

MENGARELLI, Marco; MARCONI, Marco; GERMANIA, Michele. A lifecycle-enhanced global manufacturing platform for enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, n. 1, p. 192-197, 2016.

MENNENGA, Mark et al. Exploring the Opportunities of System of Systems Engineering to Complement Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 637-642, 2019.

MIDDENDORFA, Andreas et al. Establishing EcoReliability of electronic devices in manufacturing environments. **Energy**, v. 1000, p. 10000, 2015.

Ministério de Minas e Energia – MME. Relatório técnico 63, cadeia do Cobre. 2010 Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/documents/36108/449811/Relat%C3%B3rio+N%C2%B079+Anexo+II.pdf/42999666-6e12-73c3-5ec3-000eb21047b9?version=1.0>>. Acesso em: 10 de março de 2020.

MITCHELL, Geoffrey R. Climate Change and Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 12, p. 298-306, 2017.

MOLDAVSKA, Anastasiia; WELO, Torgeir. On the applicability of sustainability assessment tools in manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 621-626, 2015.

MOSHREFI, Sepideh; KARA, Sami; HAUSCHILD, Michael. A framework for estimating regional footprint of companies towards absolute sustainability. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 446-451, 2019.

MOSLEHI, S.; ARABABADI, R. Sustainability assessment of complex energy systems using life cycle approach-case study: Arizona State University Tempe Campus. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1096-1103, 2016.

MOTTA, Wladimir Henriques; ISSBERNER, Liz-Rejane; PRADO, Patricia. Life cycle assessment and eco-innovations: What kind of convergence is possible?. **Journal of cleaner production**, v. 187, p. 1103-1114, 2018.

MUDD, Gavin M. The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. **Resources Policy**, v. 35, n. 2, p. 98-115, 2010.

MÜLLER, Andreas; BORNSCHLEGL, Martin; MANTWILL, Frank. Life Cycle Rating—An approach to support the decision-making process of manufacturing systems. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 305-312, 2018.

MÜLLER, Richard et al. CO₂-based assessment for sustainable production planning in the metal processing industry. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 289-296, 2018.

NABINGER, Alec et al. Using a Data-Mining Approach to Unveil Greenhouse Gas Emission Intensities of Different Pulp and Paper Products. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 689-692, 2019.

NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F. S. P. Resíduos eletroeletrônicos: um desafio para o desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos. In: **3rd International Workshop on Advances in Cleaner Production. São Paulo**. 2011.

NAWAZ, Waqas; KOÇ, Muammer. Development of a systematic framework for sustainability management of organizations. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1255-1274, 2018.

NGUYEN, Trung H. et al. High-resolution multi-objective optimization of feedstock landscape design for hybrid first and second generation biorefineries. **Applied energy**, v. 238, p. 1484-1496, 2019.

NOLASCO SOBRINHO, Pedro José; TENÓRIO, Jorge Alberto S. Recuperação de cromo presente em poeiras e lamas provenientes da fabricação de aço inoxidável-influência da basicidade. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 4, n. 2, p. 50-55, 2013.

OLIVEIRA, Janine Patrícia Melo et al. Saúde/doença: as consequências da falta de saneamento básico. **Informativo Técnico do Semiárido**, v. 9, n. 2, p. 23-29, 2015.

ONS - Operador Nacional Do Sistema. **EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA NO SIN 2020**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 10 de Novembro de 2020.

ONU – Organização das Nações Unidas. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 20 de Dezembro de 2018.

ONU – Organização das Nações Unidas. Sustainable Development Goals, Knowledge Platform 2016. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/conferences>>. Acesso em: 10 Agosto de 2019.

ORJI, Ifeyinwa; WEI, Sun. A detailed calculation model for costing of green manufacturing. **Industrial Management & Data Systems**, 2016.

PARANHOS FILHO, Moacyr. **Gestão da produção industrial**. Editora Ibpex, 2016.

PARRY, M. et al. Technical summary. In: (Ed.) **Climate Change 2007: Impacts, adaptation and Vulnerability**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

Pauwels Group, 2018. DISTRIBUTION TRANSFORMERS

PEARSON, Peter JG; FOXON, Timothy J. A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations. **Energy Policy**, v. 50, p. 117-127, 2012.

PEÇAS, Paulo; RIBEIRO, Inês; HENRIQUES, Elsa. Life Cycle Engineering for Materials and Technology Selection: Two Models, One Approach. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 543-548, 2014.

PENG, Tao et al. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 694-704, 2018.

PEREIRA, C. L. F. **Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais: estudo de caso suco de laranja e etanol**. 2008. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PEREIRA, F.A. Revisão Sistemática da Literatura: **Como Escrever um Artigo Científico em 72 Horas**. Editora Amazon. 1ª edição. 2017.

PFÖRTNER, Anne et al. Information management platform for the application of sustainable product development methods. **Procedia Cirp**, v. 48, p. 437-442, 2016.

PINI, Martina et al. Preparation for reuse activity of waste electrical and electronic equipment: Environmental performance, cost externality and job creation. **Journal of cleaner production**, v. 222, p. 77-89, 2019.

PIONTEK, Felix M.; MÜLLER, Martin. Literature reviews: Life cycle assessment in the context of product-service systems and the textile industry. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 758-763, 2018.

Polverini, D., & Miretti, U. (2019). An approach for the techno-economic assessment of circular economy requirements under the Ecodesign Directive. **Resources, Conservation and Recycling**, 150, 104425.

POKHAREL, Shaligram; MUTHA, Akshay. Perspectives in reverse logistics: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 4, p. 175-182, 2009.

POKHAREL, Shaligram; MUTHA, Akshay. Perspectives in reverse logistics: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 4, p. 175-182, 2009.

POLVERINI, Davide; MIRETTI, Ugo. **Uma abordagem para a avaliação tecnoeconômica dos requisitos da economia circular sob a Diretiva de Conceção Ecológica. Recursos, Conservação e Reciclagem**, v. 150, p. 104425, 2019.

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e pet utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. 2007. 188f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PRAJAPATI, Himanshu; KANT, Ravi; SHANKAR, Ravi. Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 503-520, 2019.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

RADERMACHER, K. Environmental and safety issues of polymers and polymeric material in the printing industry. **Printing on Polymers**, p. 397-415, 2016.

RALUY, Rosa Gemma et al. Life cycle assessment of central solar heating plants with seasonal storage. In: **International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry**, Freiburg. 2013.

RATTNER, Henrique. Meio ambiente, saúde e desenvolvimento sustentável. **Ciência & saúde coletiva**, v. 14, n. 6, p. 1965-1971, 2009.

REBEHY, Perla Calil Pongeluppe Wadhy et al. Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. **Journal of environmental management**, v. 250, p. 109223, 2019.

ROCHA, Cristina Sousa; ANTUNES, Paula; PARTIDÁRIO, Paulo. Design for sustainability models: A multiperspective review. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

RODERBURG, Andreas; KLOCKE, Fritz; KOSHY, Philip. Principles of technology evolutions for manufacturing process design. **Procedia Engineering**, v. 9, p. 294-310, 2011.

ROSA, Paulo Castro Cardoso da. Risco de contaminação ambiental em área de mineração de cobre e estudo toxicológico em *Drosophila melanogaster*. 2018, 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

ROZENFELD, Henrique; AMARAL, Daniel Capaldo. **Gestão de projetos em desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SAADE, Marcella RM et al. A Avaliação do Ciclo de Vida–ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. **Natureza on line**, v. 3, p. 109-116, 2014.

SALIERI, B, TURNER, DA, NOWACK, B, HISCHIER, R. Life cycle assessment of manufactured nanomaterials: Where are we?. **NanoImpact**, 10, 108-120, 2018.

SÁNCHEZ, Luis E.; CROAL, Peter. Environmental impact assessment, from Rio-92 to Rio+ 20 and beyond. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 3, p. 41-54, 2012.

SEADON, Jeffrey K. Sustainable waste management systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 16-17, p. 1639-1651, 2010.

SEKARAN, E.C. Magnetic circuits and power transformers. **Electric Renewable Energy Systems**, 209–236, 2016.

SEOW, Yingying et al. A ‘Design for Energy Minimization’ approach to reduce energy consumption during the manufacturing phase. **Energy**, v. 109, p. 894-905, 2016.

SEPPALA, J., KOSKELA, S., MELANEN, M., PALPERI, M. **The Finnish Metals**

SETAC (1994) - Society of Environmental Toxicology and Chemistry Life cycle assessment : a new way of thinking. **Environmental Toxicology and Chemistry**, 13 - 6, 853-854, 1994.

Severo, E. A., de Guimarães, J. C. F., & Dorion, E. C. H. 2018. Cleaner production, social responsibility and eco-innovation: Generations' perception for a sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, 186, 91-103.

SEVERO, Eliana Andrea; DE GUIMARÃES, Julio Cesar Ferro; DORION, Eric Charles Henri. Cleaner production and environmental management as sustainable product innovation antecedents: a survey in Brazilian industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 87-97, 2017.

SGROI, Massimiliano; VAGLIASINDI, Federico GA; ROCCARO, Paolo. Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse. Current Opinion in **Environmental Science & Health**, v. 2, p. 20-25, 2018.

SHI, Lei; WU, Kuo-Jui; TSENG, Ming-Lang. Improving corporate sustainable development by using an interdependent closed-loop hierarchical structure. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 119, p. 24-35, 2017.

SILVA, B. et al. Astro: An integrated environment for dependability and sustainability evaluation. **Sustainable computing: informatics and systems**, v. 3, n. 1, p. 1-17, 2013.

SILVA, Claudionor Oliveira; SANTOS, Gilbertânia Mendonça; SILVA, Lucicleide Neves. A degradação ambiental causada pelo descarte inadequado das embalagens plásticas: estudo de caso. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental-REGET**, v. 13, n. 13, p. 2683-2689, 2013.

SILVA, Douglas Soares da et al. **Camadas antirrefletoras de carbono amorfo e carbeto de silício para células solares de silício cristalino**. 2009.

SILVESTRE, Bruno S.; ȚÎRCĂ, Diana Mihaela. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 325-332, 2019.

SINGH, Sujit; OLUGU, Ezutah Udoncy; MUSA, Siti Nurmaya. Development of sustainable manufacturing performance evaluation expert system for small and medium enterprises. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 608-613, 2016.

SINGH, Sunpreet; RAMAKRISHNA, Seeram; GUPTA, Munish Kumar. Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. **Journal of cleaner production**, v. 168, p. 1230-1243, 2017.

SLOMSKI, Valmor et al. Sustentabilidade nas organizações: a internalização dos gastos com o descarte do produto e/ou embalagem aos custos de produção. **Revista de Administração**, v. 47, n. 2, p. 275-289, 2012.

SOARES, Sebastião Roberto; SOUZA, DM de; PEREIRA, Sibeli Warmiling. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. **Coletânea Habitare**, v. 7, p. 96-127, 2006.

Software Gabi 2018. Disponível em :< <http://www.gabi-software.com/international/index/>>. Acesso em: 03 de Outubro de 2019.

Software OpenLCA 2018. Disponível em :< <http://www.openlca.org/>>. Acesso em: 03 de Outubro de 2019.

Software SimaPro 2018. Disponível em :<<https://simapro.com/>>. Acesso em: 30 de Setembro de 2019.

Software Start. 2020. Disponível em: <http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool>. Acesso em: 10 nov. 2020.

Software Umberto 2018. Disponível em :<https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software/?gclid=EAlaIQobChMIj8Olv7h6AIVhxGRCh1ylwMnEAAYASAAEgIT5vD_BwE>. Acesso em: 30 de Setembro de 2019.

SOLEIMANI, Hamed. A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: A case study in a travertine quarry. **Resources Policy**, 2018.

SONG, Dan; CHEN, Bin. A life cycle modeling framework for greenhouse gas emissions of cement industry. **Energy Procedia**, v. 61, p. 2649-2653, 2014.

SONI, Vivek; SINGH, S. P.; BANWET, D. K. Sustainable coal consumption and energy production in India using life cycle costing and real options analysis.

Sustainable Production and Consumption, v. 6, p. 26-37, 2016.

SOO, Vi Kie; COMPSTON, Paul; DOOLAN, Matthew. Interaction between new car design and recycling impact on life cycle assessment. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 426-431, 2015.

STAVROPOULOS, Panagiotis et al. Life cycle analysis: comparison between different methods and optimization challenges. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 626-631, 2016.

STOFFELS, Pascal et al. Integrated product and production engineering approach—a tool-based method for a holistic sustainable design, process and material selection. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 790-797, 2018.

Sustainable Production: Status and Perspectives. **Annals of CIRP**, 54, 70-87, 2005.

TAN, Lianghui et al. Combining ex-ante LCA and EHS screening to assist green design: A case study of cellulose nanocrystal foam. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 494-506, 2018.

TANG, Ningning et al. Solar energy curtailment in China: Status quo, reasons and solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 509-528, 2018.

TAN-SOO, Jie-Sheng et al. Using electricity prices to curb industrial pollution. **Journal of environmental management**, v. 248, p. 109252, 2019.

TAVARES, Edson Diogo; DE SIQUEIRA, Edmar Ramos; DA SILVA, Marcos Aurélio Santos. Agricultura e uso sustentável dos recursos naturais. **Agricultura Tropical**, p. 23, 2008.

TERKAJ, Walter et al. A semantic framework for sustainable factories. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 547-552, 2014.

THOMAS, Albert; MENASSA, Carol C.; KAMAT, Vineet R. A framework to understand effect of building systems deterioration on life cycle energy.

Procedia engineering, v. 118, p. 507-514, 2015.

TOMASONI, Marco Antônio; DE SIQUEIRA PINTO, Josefa Eliane; DA SILVA, Heraldo Peixoto. A questão dos recursos hídricos e as perspectivas para o Brasil. **GeoTextos**, v. 5, n. 2, 2009.

TURAN, Onder. An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine. **Energy**, v. 86, p. 722-736, 2015.

UDOKPORO, Chinonso Kenneth et al. Impact of Lean, Agile and Green (LAG) on business competitiveness: An empirical study of fast moving consumer goods businesses. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104714, 2020.

UNFCCC - United Nations Framework Convention On Climate Change.

Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for parties included in annex i to the convention. [S.I.], 2011. Disponível em:

<http://unfccc.int/files/meetings/durban_nov_2011/decisions/application/pdf/cop17_a_nual_inventories.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2018.

VÁSQUEZ, Jenifer et al. A conceptual framework for the eco-efficiency assessment of small-and medium-sized enterprises. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117660, 2019.

VÁSQUEZ, Jenifer et al. Conceptual Framework for Evaluating the Environmental Awareness and Eco-efficiency of SMEs. **Procedia CIRP**, v. 78, p. 347-352, 2018.

VENKATACHALAM, Venkateshwaran et al. LCA and eco-design: consequential and attributional approaches for bio-based plastics. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 579-584, 2018.

VILA, C. et al. An approach to sustainable product lifecycle management (Green PLM). **Procedia engineering**, v. 132, p. 585-592, 2015.

- WANG, Fenfen; DENG, Yelin; YUAN, Chris. Comparative Life Cycle Assessment of Silicon Nanowire and Silicon Nanotube Based Lithium Ion Batteries for Electric Vehicles. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 310-315, 2019.
- WANG, Like et al. Comparative Assessment of the Environmental Impacts of Hydro-Electric, Nuclear and Wind Power Plants in China: Life Cycle Considerations. **Energy Procedia**, v. 152, p. 1009-1014, 2018.
- WANG, Xingyu et al. Emissões de CO2 do Cazaquistão na era pós-Protocolo de Kyoto: análise baseada na produção e no consumo. **Jornal de gestão ambiental**, v. 249, p. 109393, 2019.
- WETTERLUND, Elisabeth; PETTERSSON, Karin; HARVEY, Simon. Systems analysis of integrating biomass gasification with pulp and paper production— Effects on economic performance, CO2 emissions and energy use. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 932-941, 2011.
- WIJEWICKRAMA, M. K. C. S., Chileshe, N., Rameezdeen, R., & Ochoa, J. J. Information Sharing in Reverse Logistics Supply Chain of Demolition Waste: A Systematic Literature Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124359, 2020.
- WINANS, K., KENDALL, A., & DENG, H. 2017. The history and current applications of the circular economy concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 68, 825-833.
- WINDERS, John J. **Power transformers**. Marcel Dekker, 2002.
- WONG, Y. L.; LEE, K. M.; YUNG, K. C. Model scenario for integrated environmental product assessment at the use of raw materials stage of a product. **Resources, conservation and recycling**, v. 54, n. 11, p. 841-850, 2010.
- YANG, Kun; ZHU, Neng; YUAN, Tianhao. Analysis of optimum scale of biomass gasification combined cooling heating and power (CCHP) system based on life cycle assessment (LCA). **Procedia Engineering**, v. 205, p. 145-152, 2017.

- YANG, S. S. et al. The impact of automotive product remanufacturing on environmental performance. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 774-779, 2015.
- ZANNI, Sara et al. Life Cycle Assessment applied to circular designed construction materials. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 154-159, 2018.
- ZANNI, Sara et al. Life Cycle Assessment applied to circular designed construction materials. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 154-159, 2018.
- ZARBAKSHNIA, N. et al. A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design. **Journal of Cleaner Production**, v.208, p.1304-1316, 2019.
- ZENG, Dan et al. A Life Cycle Ecological Sensitivity Analysis Method for Eco-Design Decision Making of Machine Tool. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 698-703, 2018.
- ZHANG, Hao. Understanding the Linkages: A Dynamic Sustainability Assessment Method and Decision Making in Manufacturing Systems. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 233-238, 2019.
- ZHANG, Jia; LV, Fang; ZHANG, Lei. Discussion on environment impact assessment in the lifecycle of PV systems. **Energy Procedia**, v. 16, p. 234-239, 2012.
- ZHANG, Xugang et al. A review on energy, environment and economic assessment in remanufacturing based on life cycle assessment method. **Journal of Cleaner Production**, p. 120160, 2020.
- ZUBIZARRETA, Mikel et al. Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 78, p. 106286, 2019.

Apêndice

Apêndice I - ICV de Materiais utilizados na simulação

Nome da Substância	Categoria do Material	Unidade	Transformador 10kVA	Transformador 30kVA
2,4-D	Solo	µg	44,00513446	113,0853375
Acrolein	Ar	µg	30,31536273	77,90506875
Ammonium, ion	Água	g	1,046672921	2,6897625
Anthranilic acid	Ar	ng	2,348567855	6,0354
Antimony	Ar	g	1,59789556	4,10630625
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Água	mg	115,181454	295,9957688
Barium	Ar	mg	71,33860225	183,3274688
Barium-140	Ar	mBq	1,348627267	3,46573125
Bentazone	Solo	µg	13,42693246	34,50481875
Benzaldehyde	Ar	µg	11,54334584	29,6643375
Benzene	Água	g	0,329709193	0,84729375
Benzene, hexachloro-	Ar	mg	0,66467167	1,7080875
Beryllium	Ar	mg	2,821910569	7,25180625
BOD5, Biological Oxygen Demand	Água	kg	0,715913071	1,83976875
Borax, in ground	Matéria prima	mg	1,638608505	4,21093125
Bromate	Água	mg	84,00264853	215,8718063
Bromine	Água	g	2,299033771	5,90810625
Bromine, 0.0023% in water	Matéria prima	mg	6,456110069	16,59105
Butadiene	Ar	µg	0,568755472	1,4616
Butene	Água	µg	32,46822389	83,4375375
Butyrolactone	Ar	ng	55,32609131	142,178175
Cadmium, ion	Água	g	35,59589744	91,4751
Calcium	Solo	g	4,373161351	11,23824375
Calcium, ion	Água	kg	61,89814572	159,0671813
Carbon dioxide, biogenic	Ar	kg	7,324149468	18,82175625
Carbon dioxide, land transformation	Ar	g	5,885515947	15,124725
Carbon disulfide	Ar	g	156,3852095	401,8820625

Carbon monoxide, fossil	Ar	kg	0,7023202	1,8048375
Cerium-141	Água	mBq	1,402779862	3,60489375
Cesium-134	Água	Bq	0,340894309	0,8760375
Cesium-137	Ar	mBq	0,277570356	0,71330625
Chloroform	Água	µg	1,775150094	4,56181875
Chromium VI	Água	g	22,72938086	58,41045
Chromium VI	Solo	mg	17,86976548	45,92210625
Chromium, ion	Água	mg	19,47225766	50,040225
Cinnabar, in ground	Matéria prima	mg	1,477814259	3,79771875
Clay, unspecified, in ground	Matéria prima	kg	5,660959975	14,54765625
Coal, brown, in ground	Matéria prima	kg	20,5258474	52,7477625
Cobalt	Ar	g	0,315218887	0,81005625
Cobalt, in ground	Matéria prima	mg	0,930859912	2,39214375
Colemanite, in ground	Matéria prima	g	0,10880863	0,27961875
Diatomite, in ground	Matéria prima	µg	3,575515947	9,1884375
Dinitrogen monoxide	Ar	g	12,60726704	32,398425
Dipropylamine	Ar	µg	0,591782364	1,520775
Dolomite, in ground	Matéria prima	g	35,98253909	92,4687
Energy, gross calorific value, in biomass	Matéria prima	MJ	114,6419856	294,6094313
Energy, solar, converted	Matéria prima	kJ	120,3529393	309,2855625
Ethane	Ar	g	4,772476548	12,2644125
Ethene	Água	mg	61,1821232	157,2271313
Ethene, chloro-	Água	µg	137,3382708	352,9348313
Ethene, tetrachloro-	Ar	µg	0,343849281	0,88363125
Fluorine	Ar	g	0,819402752	2,10571875
Fluosilicic acid	Água	g	0,013658537	0,0351
Formaldehyde	Ar	g	0,310425266	0,7977375
Formate	Água	µg	110,170369	283,118175
Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	59,27717323	152,33175

Heat, waste	Água	MJ	90,64301751	232,9363688
Heat, waste	Solo	MJ	1,796710444	4,617225
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Ar	g	2,174924953	5,58916875
Hydrogen peroxide	Ar	µg	24,52733896	63,03088125
Indium, 0.005% in sulfide, In 0.003%, Pb, Zn, Ag, Cd, in ground	Matéria prima	mg	0,191854284	0,49303125
Iodine-129	Ar	Bq	1,503774234	3,86443125
Iodine-131	Ar	Bq	74,40684803	191,2123125
Iodine-131	Água	mBq	73,22282364	188,1695813
Iron	Ar	g	3,135881801	8,05865625
Iron	Solo	g	4,471178862	11,49013125
Iron, ion	Água	kg	13,37433396	34,36965
Iron-59	Água	mBq	0,605550344	1,55615625
Krypton-89	Ar	Bq	2,895368981	7,44058125
Lead	Água	g	27,4421232	70,52135625
Lead-210	Ar	Bq	29,89028455	76,81269375
Lead-210	Água	Bq	56,8693965	146,1441938
Lithium, ion	Água	mg	4,182051282	10,747125
Magnesite, 60% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	0,967961226	2,4874875
Manganese	Ar	g	4,664477799	11,986875
Manganese-54	Ar	µBq	10,72873671	27,5709375
Mercury	Ar	mg	104,6978268	269,0547188
Methane, biogenic	Ar	g	3,66819262	9,4266
Methane, fossil	Ar	kg	0,412645403	1,060425
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	Ar	ng	5,565722326	14,3029125
Methyl acrylate	Ar	µg	10,313793	26,50460625
Methyl formate	Ar	µg	0,317451532	0,81579375
Molybdenum	Água	g	35,24401501	90,570825
Molybdenum	Solo	µg	10,95668543	28,156725
m-Xylene	Ar	mg	2,371791745	6,09508125
Nickel	Solo	mg	0,279277674	0,71769375
Niobium-95	Ar	µBq	1,273592871	3,27290625
Nitrate	Água	kg	0,58289556	1,4979375
Nitrogen oxides	Ar	kg	1,101613508	2,83095
Ozone	Ar	g	0,52550344	1,35045

PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Ar	g	0,06435272	0,165375
Particulates, < 2.5 um	Ar	kg	0,680694184	1,7492625
Pd, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	Matéria prima	mg	0,513683552	1,320075
Phenol	Água	g	0,205250156	0,52745625
Phosphine	Ar	ng	7,857554722	20,1925125
Plutonium-alpha	Ar	µBq	0,47025641	1,208475
Polonium-210	Água	Bq	84,90894934	218,2008375
Potassium	Ar	g	1,180106316	3,0326625
Potassium, ion	Água	kg	21,03858974	54,06541875
Propanal	Água	µg	1,993686679	5,12341875
Propanol	Água	µg	1,865331457	4,79356875
Propylene oxide	Ar	mg	99,35024703	255,3123938
Pt, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	Matéria prima	µg	45,44009068	116,7729188
Radioactive species, alpha emitters	Água	mBq	159,6005034	410,1447938
Radium-224	Água	Bq	93,35314259	239,9009063
Radon-220	Ar	Bq	82,5818324	212,2205625
Ruthenium-103	Ar	µBq	0,279824891	0,7191
Ruthenium-103	Água	mBq	0,271857411	0,698625
Silicon	Água	kg	27,49824578	70,66558125
Silicon	Solo	g	0,282692308	0,72646875
Silver-110	Água	Bq	2,363101939	6,07275
Sodium chlorate	Ar	mg	2,062132583	5,2993125
Sodium hydroxide	Ar	µg	91,29724828	234,617625
Sodium nitrate, in ground	Matéria prima	µg	0,370159475	0,95124375
Solids, inorganic	Água	g	87,98163852	226,0971
Solved solids	Água	g	70,82165729	181,9990125
Styrene	Ar	mg	0,750781739	1,929375
Sulfur, in ground	Matéria prima	g	2,306388368	5,92700625

Talc, in ground	Matéria prima	g	3,315719199	8,52080625
Tantalum, 81.9% in tantalite, 1.6E-4% in crude ore, in ground	Matéria prima	mg	0,586660413	1,5076125
t-Butylamine	Água	µg	0,857861163	2,20455
Tellurium, 0.5ppm in sulfide, Te 0.2ppm, Cu and Ag, in crude ore, in ground	Matéria prima	µg	80,36450907	206,5224375
Tellurium-123m	Água	mBq	43,80224828	112,5639563
Thorium	Ar	mg	0,906716698	2,3301
Thorium-228	Água	kBq	0,37405566	0,96125625
Thorium-230	Água	kBq	0,515106316	1,32373125
Thorium-234	Água	Bq	3,775775485	9,70306875
Tin, ion	Água	g	32,0327267	82,3183875
TiO ₂ , 95% in rutile, 0.40% in crude ore, in ground	Matéria prima	µg	111,9179831	287,6092313
Titanium	Solo	mg	2,780278299	7,14481875
Titanium, ion	Água	g	42,41424328	108,9970313
Toluene, 2-chloro-	Ar	µg	0,832404628	2,13913125
Toluene, 2-chloro-	Água	µg	1,740368981	4,4724375
Transformation, from arable	Matéria prima	cm ²	3,172435897	8,15259375
Transformation, from arable, non-irrigated, fallow	Matéria prima	cm ²	0,889008755	2,28459375
Transformation, from dump site, inert material landfill	Matéria prima	cm ²	17,32850219	44,53115625
Transformation, from dump site, residual material landfill	Matéria prima	cm ²	87,91529393	225,9266063
Transformation, from dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm ²	6,430938086	16,5263625
Transformation, from dump site, slag compartment	Matéria prima	mm ²	2,122698562	5,45495625
Transformation, from forest	Matéria prima	dm ²	4,153836773	10,67461875

Transformation, from forest, intensive, clear-cutting	Matéria prima	mm2	120,6196748	309,971025
Transformation, from industrial area	Matéria prima	cm2	1,937958099	4,98020625
Transformation, from industrial area, benthos	Matéria prima	mm2	0,587886179	1,5107625
Transformation, from industrial area, vegetation	Matéria prima	mm2	11,40820513	29,31705
Transformation, from mineral extraction site	Matéria prima	cm2	23,26153846	59,778
Transformation, from sea and ocean	Matéria prima	cm2	149,3694278	383,8527563
Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	cm2	136,5379331	350,8781063
Transformation, from tropical rain forest	Matéria prima	mm2	120,6196748	309,971025
Transformation, to arable	Matéria prima	cm2	23,14509068	59,47875
Transformation, to arable, non-irrigated	Matéria prima	dm2	10,61966542	27,29064375
Transformation, to dump site, inert material landfill	Matéria prima	cm2	17,32850219	44,53115625
Transformation, to dump site, residual material landfill	Matéria prima	cm2	87,91538149	225,9268313
Transformation, to forest, intensive	Matéria prima	dm2	10,00621326	25,71418125
Transformation, to forest, intensive, clear-cutting	Matéria prima	mm2	120,6196748	309,971025
Transformation, to forest, intensive, short-cycle	Matéria prima	mm2	120,6196748	309,971025
Transformation, to industrial area	Matéria prima	cm2	112,2794309	288,5380875

Transformation, to industrial area, vegetation	Matéria prima	cm2	37,80446529	97,150725
Transformation, to pasture and meadow	Matéria prima	mm2	159,4638962	409,7937375
Transformation, to permanent crop, fruit, intensive	Matéria prima	mm2	80,1944778	206,0854875
Transformation, to urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2	2,567060663	6,5968875
Triethylene glycol	Água	mg	10,67666354	27,43711875
Trimethylamine	Água	ng	3,189727955	8,19703125
Ulexite, in ground	Matéria prima	mg	15,60012821	40,08954375
Uranium alpha	Água	Bq	217,5068543	558,953775
Uranium-234	Água	Bq	4,53043152	11,6424
Uranium-235	Ar	mBq	115,5258505	296,8808063
Uranium-235	Água	Bq	7,475203252	19,2099375
Uranium-238	Ar	Bq	8,729643527	22,433625
Uranium-238	Água	Bq	40,49298624	104,0597438
Urea	Água	µg	2,292642276	5,89168125
Vermiculite, in ground	Matéria prima	mg	5,530963102	14,2135875
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Água	g	0,662920575	1,7035875
Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	Matéria prima	cm3	1,717188868	4,41286875
Volume occupied, final repository for radioactive waste	Matéria prima	cm3	0,433592871	1,11425625
Volume occupied, underground deposit	Matéria prima	cm3	6,530181363	16,7814
Water, river	Matéria prima	m3	2,450262664	6,2967375

Water, salt, sole	Matéria prima	l	25,93222014	66,641175
Water, well, in ground	Matéria prima	l	134,3068418	345,1446
Wood, hard, standing	Matéria prima	l	2,574108818	6,615
Wood, primary forest, standing	Matéria prima	cm3	1,248902439	3,20945625
Wood, soft, standing	Matéria prima	l	8,805991245	22,629825
Wood, unspecified, standing/m3	Matéria prima	l	17,73981238	45,58815
Xenon-133	Ar	kBq	1,68282364	4,32455625
Xenon-135	Ar	kBq	0,689734209	1,77249375
Xylene	Água	g	0,191066291	0,49100625
Zinc	Solo	mg	32,40262351	83,26895625
Zinc, 9.0% in sulfide, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, In, in ground	Matéria prima	g	15,68499062	40,307625
Zinc, ion	Água	kg	1,88120075	4,83435
Zirconium	Ar	mg	0,211860538	0,54444375
Zirconium, 50% in zircon, 0.39% in crude ore, in ground	Matéria prima	mg	0,777573483	1,998225
Zirconium-95	Água	mBq	1,53054409	3,933225
Acenaphthene	Ar	ng	143,6609912	369,1830938
Acenaphthene	Água	µg	11,61312695	29,8436625
Acenaphthylene	Água	µg	0,726288305	1,86643125
Acetaldehyde	Ar	mg	57,41530019	147,5470688
Acetaldehyde	Água	mg	44,6775985	114,81345
Acetic acid	Ar	g	0,578145716	1,48573125
Acetic acid	Água	g	0,643592871	1,65391875
Acetone	Ar	mg	42,58479987	109,4353313
Acetone	Água	µg	3,259509068	8,37635625
Acetonitrile	Ar	µg	131,1377111	337,0005
Acetonitrile	Água	ng	17,56238274	45,1321875
Acetyl chloride	Água	µg	1,08184803	2,78015625
Acidity, unspecified	Água	mg	6,930963102	17,8113375
Aclonifen	Solo	µg	26,30907755	67,60963125

Acrylate, ion	Água	µg	21,51451532	55,2884625
Acrylic acid	Ar	µg	9,090325203	23,3605125
Actinides, radioactive, unspecified	Ar	mBq	14,70100688	37,7789625
Actinides, radioactive, unspecified	Água	Bq	2,442557849	6,2769375
Aerosols, radioactive, unspecified	Ar	Bq	0,365015635	0,938025
Aldehydes, unspecified	Ar	mg	12,40346154	31,87468125
Aldrin	Solo	µg	0,234099437	0,60159375
Aluminium	Ar	kg	0,309462164	0,7952625
Aluminium	Água	kg	4,707642276	12,0978
Aluminium	Solo	g	0,99376798	2,55380625
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	0,732898687	1,88341875
Aminopropanol	Ar	ng	5,671094434	14,5737
Aminopropanol	Água	ng	13,80615385	35,47935
Ammonia	Ar	g	123,6393277	317,7309938
Ammonium carbonate	Ar	µg	31,94293934	82,08765
Anhydrite, in ground	Matéria prima	mg	7,002933083	17,9962875
Aniline	Ar	µg	2,089515322	5,36968125
Aniline	Água	µg	5,016425891	12,89131875
Antimony	Água	g	17,8165541	45,7853625
Antimony	Solo	ng	208,3330238	535,3786688
Antimony-122	Água	mBq	0,800950594	2,0583
Antimony-124	Ar	µBq	1,986660413	5,1053625
Antimony-124	Água	Bq	0,401460288	1,03168125
Antimony-125	Ar	µBq	20,73254221	53,27893125
Antimony-125	Água	Bq	0,37040025	0,9518625
Argon-41	Ar	Bq	188,0729487	483,3138938
Arsenic	Ar	g	12,95825203	33,30039375
Arsenic	Solo	mg	0,39279237	1,00940625
Arsenic, ion	Água	g	55,7753127	143,3325938
Arsine	Ar	pg	105,9595779	272,2971938
Atrazine	Solo	ng	61,41151657	157,8166313

Barite	Água	g	9,29905566	23,8969125
Barite, 15% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	0,167141964	0,429525
Barium	Água	g	18,01887117	46,30528125
Barium	Solo	g	0,470409631	1,20886875
Barium-140	Água	mBq	3,508580363	9,016425
Basalt, in ground	Matéria prima	g	40,09097874	103,0266563
Benomyl	Solo	µg	0,280437774	0,720675
Benzal chloride	Ar	pg	2,716844903	6,98180625
Benzene	Ar	g	1,155766104	2,9701125
Benzene, 1,2-dichloro-	Ar	µg	1,0161601	2,61135
Benzene, 1,2-dichloro-	Água	µg	32,69674171	84,0247875
Benzene, 1-methyl-2-nitro-	Ar	ng	2,772858036	7,12575
Benzene, chloro-	Água	mg	0,627395247	1,61229375
Benzene, ethyl-	Ar	mg	40,64717011	104,4559688
Benzene, ethyl-	Água	mg	44,81400876	115,164
Benzene, pentachloro-	Ar	µg	2,449956223	6,29595
Benzo(a)pyrene	Ar	mg	2,699224515	6,936525
Beryllium	Água	g	7,316532208	18,80218125
Borate	Água	µg	104,7713727	269,2437188
Boron	Ar	g	0,75888055	1,9501875
Boron	Água	kg	1,541926204	3,962475
Boron	Solo	mg	12,57386492	32,3125875
Boron trifluoride	Ar	pg	1,450125078	3,7265625
Bromide	Água	mg	5,436404003	13,9705875
Bromine	Ar	mg	63,64729206	163,562175
Butane	Ar	g	2,346510319	6,0301125
Butanediol	Ar	µg	0,220309568	0,56615625
Butanediol	Água	ng	88,1280738	226,4734125
Butanol	Ar	ng	6,086935585	15,6423375
Butanol	Água	µg	59,66755785	153,3349688
Butene	Ar	mg	39,57464665	101,699775
Butene, 2-methyl-	Ar	pg	96,18262664	247,172175
Butyl acetate	Água	µg	77,5497561	199,289025
Butyrolactone	Água	ng	132,7849218	341,2335375
Cadmium	Ar	g	4,485931832	11,52804375

Cadmium	Solo	µg	42,92646029	110,3133375
Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	Matéria prima	mg	10,49551282	26,97159375
Calcite, in ground	Matéria prima	kg	19,203005	49,34829375
Calcium	Ar	g	0,957170106	2,45975625
Carbetamide	Solo	µg	20,33891807	52,2673875
Carbofuran	Solo	µg	153,7460256	395,0998313
Carbon	Solo	g	3,00054409	7,7108625
Carbon dioxide, fossil	Ar	kg	171,756601	441,3837938
Carbon dioxide, in air	Matéria prima	kg	10,61909631	27,28918125
Carbon disulfide	Água	µg	70,56439962	181,3379063
Carbon monoxide, biogenic	Ar	g	0,897151345	2,30551875
Carbon, in organic matter, in soil	Matéria prima	g	0,194196373	0,49905
Carbon-14	Ar	kBq	1,488824265	3,8260125
Carbonate	Água	g	3,120537836	8,019225
Carboxylic acids, unspecified	Água	g	8,104130707	20,82616875
Cerium-141	Ar	mBq	0,326929331	0,84015
Cerium-144	Água	mBq	0,427048155	1,0974375
Cesium	Água	mg	1,867060663	4,7980125
Cesium-134	Ar	µBq	15,65813321	40,23860625
Cesium-136	Água	mBq	0,248961851	0,6397875
Cesium-137	Água	kBq	0,281028768	0,72219375
Chloramine	Ar	µg	2,01888055	5,1881625
Chloramine	Água	µg	18,01657286	46,299375
Chlorate	Água	g	0,744587242	1,91345625
Chloride	Água	kg	1,934302689	4,9708125
Chloride	Solo	g	7,818986867	20,0934
Chlorinated solvents, unspecified	Água	mg	14,92860538	38,36385
Chlorine	Ar	g	0,252639149	0,6492375
Chlorine	Água	mg	7,830106316	20,121975
Chloroacetic acid	Ar	µg	3,426935585	8,8066125
Chloroacetic acid	Água	mg	0,436197624	1,12095

Chloroacetyl chloride	Água	ng	18,41321764	47,31868125
Chloroform	Ar	µg	28,291207	72,70335
Chlorosilane, trimethyl-	Ar	µg	19,96899937	51,3167625
Chlorosulfonic acid	Ar	ng	25,60949343	65,811825
Chlorosulfonic acid	Água	ng	63,86368355	164,1182625
Chlorothalonil	Solo	mg	15,36559099	39,486825
Chromium	Ar	g	25,23261413	64,8433125
Chromium	Solo	mg	5,188339587	13,33310625
Chromium VI	Ar	g	0,62866479	1,61555625
Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	7,29840838	18,75560625
Chromium-51	Ar	µBq	20,95000625	53,837775
Chromium-51	Água	Bq	0,441210131	1,13383125
Chrysotile, in ground	Matéria prima	mg	15,92556911	40,92586875
Clay, bentonite, in ground	Matéria prima	g	161,1656316	414,1668938
Coal, hard, unspecified, in ground	Matéria prima	kg	43,39805191	111,5252438
Cobalt	Água	g	119,2147498	306,3606188
Cobalt	Solo	µg	42,18226704	108,4008938
Cobalt-57	Água	mBq	7,903170732	20,3097375
Cobalt-58	Ar	µBq	29,1737586	74,97135
Cobalt-58	Água	Bq	3,248849281	8,3489625
Cobalt-60	Ar	mBq	0,257717323	0,6622875
Cobalt-60	Água	Bq	2,548542839	6,5493
COD, Chemical Oxygen Demand	Água	kg	1,34127267	3,44683125
Copper	Ar	g	36,22679487	93,09639375
Copper	Solo	mg	12,81873358	32,94185625
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	17,71013133	45,511875
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	44,85561914	115,2709313

Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	11,89859912	30,577275
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	59,03061914	151,69815
Copper, ion	Água	kg	0,281948093	0,72455625
Cumene	Ar	mg	95,49600063	245,4076688
Cumene	Água	g	0,229480926	0,589725
Cyanide	Ar	g	0,344965604	0,8865
Cyanide	Água	g	6,301510319	16,19375625
Cyanoacetic acid	Ar	ng	20,97320826	53,8974
Cypermethrin	Solo	µg	22,60494371	58,09066875
Dichromate	Água	mg	0,466535335	1,1989125
Diethylamine	Ar	µg	0,931100688	2,3927625
Diethylamine	Água	µg	2,234681051	5,74273125
Dimethyl malonate	Ar	ng	26,30036585	67,58724375
Dimethylamine	Água	µg	1,066701063	2,74123125
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Ar	µg	0,378674171	0,973125
Dipropylamine	Água	µg	1,420268918	3,6498375
DOC, Dissolved Organic Carbon	Água	kg	0,468899312	1,2049875
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Matéria prima	kJ	13,46381488	34,5996
Energy, kinetic (in wind), converted	Matéria prima	MJ	8,408208255	21,60759375
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Matéria prima	GJ	0,443442777	1,13956875
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Ar	mg	4,919065041	12,64111875
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Ar	ng	141,9076204	364,6772438

Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Ar	µg	0,431425891	1,1086875
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	Ar	µg	44,29459037	113,8291875
Ethane, 1,2-dichloro-	Ar	mg	7,500747342	19,27558125
Ethane, 1,2-dichloro-	Água	mg	1,514915572	3,8930625
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Ar	mg	0,608746091	1,56436875
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Ar	g	0,006522827	0,0167625
Ethanol	Ar	mg	66,21426517	170,1588375
Ethanol	Água	mg	0,349058787	0,89701875
Ethene	Ar	g	1,74021576	4,47204375
Ethene, chloro-	Ar	mg	3,203167605	8,23156875
Ethyl acetate	Ar	mg	16,50973421	42,42706875
Ethyl acetate	Água	µg	33,37224828	85,76071875
Ethyl cellulose	Ar	µg	32,99703252	84,79648125
Ethylamine	Ar	µg	1,446579112	3,71745
Ethylamine	Água	µg	3,471851157	8,9220375
Ethylene diamine	Ar	µg	111,5875078	286,7599688
Ethylene diamine	Água	mg	0,270237649	0,6944625
Ethylene oxide	Ar	mg	1,39104753	3,57474375
Ethylene oxide	Água	µg	47,53895247	122,1666188
Ethyne	Ar	g	0,241213258	0,619875
Feldspar, in ground	Matéria prima	µg	150,224728	386,050725
Fenpiclonil	Solo	mg	0,605681676	1,55649375
Fluoride	Água	kg	2,83749531	7,29185625
Fluoride	Solo	mg	59,13329894	151,9620188
Fluorine, 4.5% in apatite, 1% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	4,683389619	12,035475
Fluorine, 4.5% in apatite, 3% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	2,060490932	5,29509375
Fluorspar, 92%, in ground	Matéria prima	g	134,8077861	346,4319375
Fluosilicic acid	Ar	g	0,007595372	0,01951875
Formaldehyde	Água	mg	10,17473421	26,14725

Formamide	Ar	µg	1,049474672	2,6969625
Formamide	Água	µg	2,518796123	6,47285625
Formic acid	Ar	mg	0,897808005	2,30720625
Formic acid	Água	µg	0,731169481	1,878975
Furan	Ar	mg	0,249049406	0,6400125
Gallium, 0.014% in bauxite, in ground	Matéria prima	µg	0,341135084	0,87665625
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	Matéria prima	m3	0,419737336	1,07865
Gas, natural, in ground	Matéria prima	m3	20,99936523	53,96461875
Glutaraldehyde	Água	mg	1,1480394	2,95025625
Glyphosate	Solo	mg	1,654368355	4,25143125
Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	32,32505003	83,06960625
Gold, Au 1.4E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	70,97470294	182,3923125
Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	108,4062289	278,58465
Gold, Au 4.3E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	26,86747967	69,044625
Gold, Au 4.9E-5%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	64,35101313	165,3706125
Gold, Au 6.7E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	99,62580363	256,020525
Gold, Au 7.1E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	112,3384647	288,6897938
Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	6,731557223	17,2989
Granite, in ground	Matéria prima	µg	101,9916417	262,1003063
Gravel, in ground	Matéria prima	kg	62,64774547	160,9935188
Gypsum, in ground	Matéria prima	mg	13,61451845	34,98688125
Heat, waste	Ar	GJ	3,089543465	7,939575
Helium	Ar	mg	81,51186992	209,47095
Heptane	Ar	g	0,39561601	1,0166625

Hexane	Ar	g	1,005193871	2,58316875
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	Ar	mg	2,42909631	6,24234375
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	Água	g	0,242723577	0,62375625
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Ar	g	0,387166979	0,99495
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Água	mg	22,40529706	57,5776125
Hydrocarbons, aromatic	Ar	g	2,70395247	6,948675
Hydrocarbons, aromatic	Água	g	1,000050031	2,56995
Hydrocarbons, chlorinated	Ar	mg	5,943980613	15,27496875
Hydrocarbons, unspecified	Água	g	1,400043777	3,5978625
Hydrogen	Ar	g	5,490709819	14,11014375
Hydrogen chloride	Ar	g	24,10944028	61,95695625
Hydrogen fluoride	Ar	g	1,762388993	4,529025
Hydrogen peroxide	Água	mg	6,34014384	16,2930375
Hydrogen sulfide	Ar	g	0,933005003	2,39765625
Hydrogen sulfide	Água	mg	61,27567542	157,4675438
Hydrogen-3, Tritium	Ar	kBq	8,602448405	22,10675625
Hydrogen-3, Tritium	Água	kBq	643,8085397	1654,472981
Hydroxide	Água	mg	0,720093809	1,8505125
Hypochlorite	Água	mg	34,70454659	89,1844875
Iodide	Água	g	0,196013133	0,50371875
Iodine	Ar	mg	36,35887117	93,43580625
Iodine, 0.03% in water	Matéria prima	mg	1,408383365	3,61929375
Iodine-133	Ar	mBq	3,369609131	8,65929375
Iodine-133	Água	mBq	2,202614134	5,660325
Iodine-135	Ar	mBq	3,810972483	9,79351875
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	12,05989681	30,99178125
Isocyanic acid	Ar	mg	0,76004065	1,95316875
Isoprene	Ar	µg	11,55717949	29,6998875

Isopropylamine	Ar	µg	0,296350844	0,76156875
Isopropylamine	Água	µg	0,711250782	1,8277875
Kaolinite, 24% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	44,41412445	114,1363688
Kieserite, 25% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	2,724790494	7,002225
Krypton-85	Ar	kBq	0,588827392	1,51318125
Krypton-85m	Ar	Bq	28,85096623	74,14183125
Krypton-87	Ar	Bq	11,4749656	29,4886125
Krypton-88	Ar	Bq	11,30585366	29,054025
Lactic acid	Ar	µg	0,463558474	1,1912625
Lactic acid	Água	µg	1,112557849	2,859075
Lanthanum-140	Ar	µBq	115,2613258	296,201025
Lanthanum-140	Água	mBq	3,736923077	9,603225
Lead	Ar	g	32,84144778	84,39665625
Lead	Solo	mg	0,423677298	1,088775
Lead, 5.0% in sulfide, Pb 3.0%, Zn, Ag, Cd, In, in ground	Matéria prima	g	0,786372733	2,0208375
Linuron	Solo	µg	202,7411882	521,00865
Lithium, 0.15% in brine, in ground	Matéria prima	µg	30,36121951	78,0229125
Magnesium	Ar	g	1,878333333	4,82698125
Magnesium	Água	kg	37,43629769	96,2046
Magnesium	Solo	g	0,821525954	2,111175
Magnesium, 0.13% in water	Matéria prima	mg	1,397592245	3,5915625
Mancozeb	Solo	mg	19,95674171	51,2852625
Manganese	Água	kg	4,205362727	10,80703125
Manganese	Solo	mg	78,13201689	200,7853313
Manganese, 35.7% in sedimentary deposit, 14.2% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	182,242439	468,330525
Manganese-54	Água	Bq	0,200281426	0,5146875
Mercury	Água	mg	106,4538024	273,5672625
Mercury	Solo	µg	5,130247029	13,18381875
Metaldehyde	Solo	µg	7,763717949	19,95136875
Metamorphous rock, graphite containing, in ground	Matéria prima	g	0,40242339	1,03415625

Methane, bromo-, Halon 1001	Ar	pg	0,621463415	1,59705
Methane, bromochlorodifluoro -, Halon 1211	Ar	mg	0,961854284	2,47179375
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Ar	mg	1,050306442	2,6991
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Ar	mg	3,705293934	9,52194375
Methane, dichloro-, HCC-30	Ar	µg	6,78137586	17,426925
Methane, dichloro-, HCC-30	Água	mg	23,82015947	61,21355625
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Ar	µg	5,563686679	14,29768125
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	Ar	ng	3,42833646	8,8102125
Methane, monochloro-, R-40	Ar	µg	4,041307067	10,3854375
Methane, tetrachloro-, CFC-10	Ar	mg	0,549077548	1,41103125
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Ar	g	0,058442777	0,1501875
Methane, trifluoro-, HFC-23	Ar	µg	1,090844278	2,803275
Methanesulfonic acid	Ar	ng	21,19404315	54,46490625
Methanol	Ar	g	0,316685428	0,813825
Methanol	Água	mg	15,98762351	41,0853375
Methyl acetate	Ar	ng	0,743536585	1,91075625
Methyl acetate	Água	ng	1,784474672	4,58578125
Methyl acrylate	Água	µg	201,4830926	517,7755688
Methyl amine	Ar	ng	40,01325203	102,8269125
Methyl amine	Água	ng	96,03004065	246,7800563
Methyl borate	Ar	ng	212,6518355	546,4772438
Methyl ethyl ketone	Ar	mg	16,43121951	42,2253
Methyl formate	Água	ng	126,7414572	325,7029125
Methyl lactate	Ar	µg	0,50891182	1,3078125

Methyl-1-propanol	Ar	µg	0,992257661	2,549925
Methyl-1-propanol	Água	µg	2,381400876	6,119775
Methyl-2-butene	Água	ng	0,230838024	0,5932125
Methyl-2-pentanone	Água	ng	16,12383677	41,43538125
Metolachlor	Solo	mg	1,467045028	3,77004375
Metribuzin	Solo	mg	0,702692308	1,80579375
Molybdenum	Ar	mg	6,932013759	17,8140375
Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	1,097016886	2,8191375
Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore, in ground	Matéria prima	mg	156,288965	401,6347313
Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	0,224731082	0,57751875
Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	0,572695435	1,471725
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 4.1E-2% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	4,001185116	10,28233125
Molybdenum-99	Água	mBq	1,288411507	3,3109875
Monoethanolamine	Ar	mg	24,62741401	63,28805625
m-Xylene	Água	µg	2,832307692	7,278525
Napropamide	Solo	µg	13,73575985	35,29845
Nickel	Ar	g	25,54133208	65,6366625
Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	0,2718793	0,69868125

Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	16,74114134	43,02174375
Nickel, ion	Água	g	146,2477736	375,8306625
Niobium-95	Água	mBq	32,02591932	82,30089375
Nitrate	Ar	mg	21,62678236	55,57696875
Nitrite	Água	mg	18,23852408	46,86975
Nitrobenzene	Ar	µg	2,792667292	7,17665625
Nitrobenzene	Água	µg	11,19157286	28,76034375
Nitrobenzoic acid	Ar	ng	3,210981864	8,25165
Nitrogen	Água	g	1,229924953	3,1606875
Nitrogen, organic bound	Água	g	37,70136961	96,8857875
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Ar	g	201,5104534	517,8458813
Noble gases, radioactive, unspecified	Ar	kBq	14450,89259	37136,21344
Occupation, arable, non-irrigated	Matéria prima	m2a	0,057786116	0,1485
Occupation, construction site	Matéria prima	m2a	0,071422764	0,18354375
Occupation, dump site	Matéria prima	m2a	6,676463415	17,15731875
Occupation, dump site, benthos	Matéria prima	cm2a	149,2440494	383,5305563
Occupation, forest, intensive	Matéria prima	m2a	15,01756098	38,59245
Occupation, forest, intensive, normal	Matéria prima	m2a	7,071969981	18,1737
Occupation, forest, intensive, short-cycle	Matéria prima	cm2a	33,77335835	86,7915
Occupation, industrial area	Matéria prima	m2a	0,619690432	1,59249375
Occupation, industrial area, benthos	Matéria prima	mm2a	125,0220356	321,2843063

Occupation, industrial area, built up	Matéria prima	m2a	0,703874296	1,80883125
Occupation, industrial area, vegetation	Matéria prima	m2a	0,186819887	0,48009375
Occupation, mineral extraction site	Matéria prima	m2a	0,246860538	0,6343875
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	Matéria prima	cm2a	56,96789556	146,3973188
Occupation, shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	m2a	0,052729831	0,13550625
Occupation, traffic area, rail embankment	Matéria prima	m2a	0,018452158	0,04741875
Occupation, traffic area, rail network	Matéria prima	m2a	0,020422139	0,05248125
Occupation, traffic area, road embankment	Matéria prima	m2a	0,32097561	0,82485
Occupation, traffic area, road network	Matéria prima	m2a	0,453467792	1,16533125
Occupation, urban, discontinuously built	Matéria prima	mm2a	128,8729112	331,1803688
Occupation, water bodies, artificial	Matéria prima	m2a	0,120913071	0,310725
Occupation, water courses, artificial	Matéria prima	m2a	0,512435897	1,31686875
Oil, crude, in ground	Matéria prima	kg	30,37085053	78,0476625
Oils, biogenic	Solo	mg	126,8877392	326,0788313
Oils, unspecified	Água	g	127,5229049	327,7110938
Oils, unspecified	Solo	g	130,7367761	335,9701688
Olivine, in ground	Matéria prima	mg	5,815537836	14,94489375
Orbencarb	Solo	mg	3,79459975	9,75144375
o-Xylene	Água	ng	84,86228268	218,0809125
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Água	mg	19,73498749	50,71539375
Particulates, > 10 um	Ar	kg	0,231954346	0,59608125

Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Ar	kg	0,528327079	1,35770625
Pd, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	Matéria prima	mg	1,234477799	3,1723875
Peat, in ground	Matéria prima	g	21,63194809	55,59024375
Pentane	Ar	g	3,063714822	7,8732
Pentanol	Ar	µg	0,573811757	1,47459375
Pentanol	Água	µg	1,377170106	3,53908125
Pentene	Ar	µg	0,433614759	1,1143125
Pentene	Água	µg	1,040697311	2,67440625
Phenol	Ar	mg	31,55207317	81,08319375
Phenol, 2,4-dichloro-	Ar	ng	15,78718887	40,57025625
Phenol, pentachloro-	Ar	mg	0,403145716	1,0360125
Phosphate	Água	kg	7,743273921	19,89883125
Phosphorus	Ar	mg	37,40252345	96,11780625
Phosphorus	Água	mg	116,5620607	299,5436813
Phosphorus	Solo	mg	66,78398374	171,6229125
Phosphorus, 18% in apatite, 12% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	8,340703565	21,43411875
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore, in ground	Matéria prima	g	18,73360225	48,1420125
Pirimicarb	Solo	µg	1,270090682	3,26390625
Platinum	Ar	ng	21,29466542	54,7234875
Plutonium-238	Ar	µBq	0,205140713	0,527175
Polonium-210	Ar	Bq	54,02791745	138,8421
Polychlorinated biphenyls	Ar	mg	0,834046279	2,14335
Potassium	Solo	g	0,439086929	1,128375
Potassium-40	Ar	Bq	8,111485303	20,84506875
Potassium-40	Água	Bq	10,92085366	28,06464375
Propanal	Ar	µg	15,8008474	40,60535625
Propane	Ar	g	3,392548468	8,71824375
Propanol	Ar	µg	5,66120075	14,548275
Propanol	Ar	mg	3,511732333	9,024525
Propanol	Água	µg	1,640753596	4,21644375

Propene	Ar	g	0,447601626	1,15025625
Propene	Água	g	0,27087242	0,69609375
Propionic acid	Ar	mg	10,87834584	27,95540625
Propionic acid	Água	ng	68,74407129	176,6599875
Propylamine	Ar	µg	0,332335835	0,85404375
Propylamine	Água	µg	0,797623515	2,04975
Propylene oxide	Água	g	0,239068168	0,6143625
Protactinium-234	Ar	Bq	0,204768605	0,52621875
Protactinium-234	Água	Bq	3,7753596	9,702
Pt, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	Matéria prima	µg	12,67536273	32,57341875
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Água	kBq	1,464724828	3,76408125
Radioactive species, other beta emitters	Ar	Bq	5,743502189	14,759775
Radium-226	Ar	Bq	14,51151657	37,29200625
Radium-226	Água	kBq	2,559859287	6,57838125
Radium-228	Ar	Bq	31,10775485	79,941375
Radium-228	Água	Bq	186,7134428	479,8202063
Radon-222	Ar	kBq	27059,15666	69537,20063
Rh, Rh 2.0E-5%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	Matéria prima	µg	11,72889619	30,14116875
Rh, Rh 2.4E-5%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	Matéria prima	µg	36,73618824	94,40544375
Rhenium, in crude ore, in ground	Matéria prima	µg	0,847726704	2,17850625
Rubidium	Água	mg	18,67062852	47,98018125
Sand, unspecified, in ground	Matéria prima	g	0,836388368	2,14936875
Scandium	Ar	mg	3,084509068	7,9266375
Scandium	Água	g	12,78233271	32,8483125
Selenium	Ar	g	1,291497811	3,31891875

Selenium	Água	g	26,74054722	68,71843125
Shale, in ground	Matéria prima	mg	19,86408693	51,04715625
Silicon	Ar	g	7,700459662	19,78880625
Silicon tetrafluoride	Ar	µg	141,6189962	363,9355313
Silver	Ar	µg	110,6353502	284,3130938
Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In, in ground	Matéria prima	mg	0,750322076	1,92819375
Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore, in ground	Matéria prima	mg	0,535747342	1,376775
Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	49,42601939	127,0160438
Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	112,8832958	290,0899125
Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	110,6445654	284,336775
Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	Matéria prima	µg	73,00936523	187,6210313
Silver, ion	Água	g	1,965669168	5,05141875
Silver-110	Ar	µBq	2,773208255	7,12665
Sodium	Ar	g	0,502257661	1,2907125
Sodium	Solo	g	1,914121326	4,91895
Sodium chloride, in ground	Matéria prima	kg	1,168549093	3,0029625
Sodium dichromate	Ar	mg	0,150178236	0,38593125
Sodium formate	Ar	mg	0,750540963	1,92875625
Sodium formate	Água	mg	1,803145716	4,6337625
Sodium sulphate, various forms, in ground	Matéria prima	g	39,02386179	100,2843563
Sodium, ion	Água	kg	8,5434803	21,95521875
Sodium-24	Água	mBq	9,748474046	25,0518375
Stibnite, in ground	Matéria prima	µg	0,371582239	0,9549

Strontium	Ar	mg	99,67131019	256,1374688
Strontium	Água	kg	0,583595997	1,4997375
Strontium	Solo	mg	9,429534084	24,23221875
Strontium-89	Água	mBq	43,50661976	111,8042438
Strontium-90	Água	kBq	2,057163852	5,28654375
Sulfate	Ar	g	5,053964978	12,9877875
Sulfate	Água	kg	227,5439962	584,7474375
Sulfide	Água	mg	5,254990619	13,5043875
Sulfite	Água	mg	94,39552533	242,5796438
Sulfur	Água	g	0,34369606	0,8832375
Sulfur	Solo	g	0,594452783	1,5276375
Sulfur dioxide	Ar	kg	6,523155097	16,76334375
Sulfur hexafluoride	Ar	mg	4,787120075	12,30204375
Sulfur trioxide	Ar	µg	22,4730863	57,75181875
Sulfuric acid	Ar	µg	19,21038149	49,36725
Sulfuric acid	Solo	ng	11,78631019	30,2887125
Suspended solids, unspecified	Água	g	63,38948718	162,8996625
Sylvite, 25 % in sylvinite, in ground	Matéria prima	g	6,832923702	17,55939375
t-Butyl methyl ether	Ar	µg	170,9663321	439,3529438
t-Butyl methyl ether	Água	mg	3,97789556	10,22248125
t-Butylamine	Ar	µg	0,357442151	0,9185625
Tebutam	Solo	µg	32,54737336	83,6409375
Technetium-99m	Água	mBq	29,83444653	76,6692
Teflubenzuron	Solo	µg	46,84600063	120,3858563
Tellurium-132	Água	µBq	74,60170106	191,71305
Terpenes	Ar	µg	109,2814259	280,83375
Thallium	Ar	mg	0,766497811	1,9697625
Thallium	Água	g	3,311166354	8,50910625
Thiram	Solo	µg	0,497529706	1,2785625
Thorium-228	Ar	Bq	2,940153221	7,55566875
Thorium-230	Ar	Bq	1,015262664	2,60904375
Thorium-232	Ar	Bq	2,215222014	5,692725
Thorium-232	Água	Bq	0,834943715	2,14565625
Thorium-234	Ar	Bq	0,204790494	0,526275
Tin	Ar	g	1,752692308	4,50410625
Tin	Solo	µg	15,11391495	38,8400625
Tin, 79% in cassiterite, 0.1% in crude ore, in ground	Matéria prima	mg	154,8233646	397,8684

TiO2, 54% in ilmenite, 2.6% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	0,353677298	0,9088875
Titanium	Ar	g	0,226438399	0,58190625
TOC, Total Organic Carbon	Água	kg	0,480303315	1,23429375
Toluene	Ar	g	0,459202627	1,18006875
Toluene	Água	g	0,235325203	0,60474375
Transformation, from arable, non-irrigated	Matéria prima	dm2	10,61101939	27,268425
Transformation, from forest, extensive	Matéria prima	dm2	15,70762351	40,3657875
Transformation, from industrial area, built up	Matéria prima	mm2	6,687560976	17,1858375
Transformation, from pasture and meadow	Matéria prima	dm2	2,024221388	5,2018875
Transformation, from pasture and meadow, intensive	Matéria prima	mm2	86,59534084	222,5345625
Transformation, from unknown	Matéria prima	dm2	8,82148843	22,66965
Transformation, to arable, non-irrigated, fallow	Matéria prima	cm2	1,165856785	2,99604375
Transformation, to dump site	Matéria prima	dm2	4,933861789	12,67914375
Transformation, to dump site, benthos	Matéria prima	cm2	149,2440494	383,5305563
Transformation, to dump site, sanitary landfill	Matéria prima	mm2	6,430938086	16,5263625
Transformation, to dump site, slag compartment	Matéria prima	mm2	2,122698562	5,45495625
Transformation, to forest	Matéria prima	cm2	112,498252	289,1004188
Transformation, to forest, intensive, normal	Matéria prima	dm2	5,467748593	14,0511375

Transformation, to heterogeneous, agricultural	Matéria prima	cm2	17,62546592	45,2943
Transformation, to industrial area, benthos	Matéria prima	mm2	12,53921513	32,22354375
Transformation, to industrial area, built up	Matéria prima	cm2	141,9470419	364,77855
Transformation, to mineral extraction site	Matéria prima	dm2	4,754111945	12,21721875
Transformation, to sea and ocean	Matéria prima	mm2	0,587886179	1,5107625
Transformation, to shrub land, sclerophyllous	Matéria prima	cm2	105,3293371	270,6775875
Transformation, to traffic area, rail embankment	Matéria prima	mm2	42,96034396	110,4004125
Transformation, to traffic area, rail network	Matéria prima	mm2	47,22086617	121,3491938
Transformation, to traffic area, road embankment	Matéria prima	cm2	21,97708881	56,47719375
Transformation, to traffic area, road network	Matéria prima	cm2	66,42978111	170,712675
Transformation, to unknown	Matéria prima	cm2	3,180709819	8,17385625
Transformation, to water bodies, artificial	Matéria prima	cm2	11,91713884	30,62491875
Transformation, to water courses, artificial	Matéria prima	cm2	62,93363352	161,7282
Tributyltin compounds	Água	mg	4,097035647	10,52865
Trimethylamine	Ar	ng	1,329058787	3,41544375
Tungsten	Ar	mg	0,279978111	0,71949375
Tungsten	Água	g	48,44297686	124,4898
Uranium	Ar	mg	1,193217636	3,06635625
Uranium alpha	Ar	Bq	11,12894934	28,5994125

Uranium, in ground	Matéria prima	g	0,840634772	2,16028125
Uranium-234	Ar	Bq	2,639337086	6,782625
Vanadium	Ar	g	0,555272045	1,42695
Vanadium	Solo	µg	79,5803252	204,507225
Vanadium, ion	Água	g	18,61621326	47,84034375
Volume occupied, reservoir	Matéria prima	m3y	1,101525954	2,830725
Water	Ar	kg	0,466579112	1,199025
Water, cooling, unspecified natural origin/m3	Matéria prima	m3	2,293145716	5,892975
Water, lake	Matéria prima	l	5,825278299	14,969925
Water, salt, ocean	Matéria prima	l	75,98027205	195,2557313
Water, turbine use, unspecified natural origin	Matéria prima	m3	5021,526391	12904,42613
Water, unspecified natural origin/m3	Matéria prima	m3	0,491313321	1,2625875
Xenon-131m	Ar	Bq	52,7987586	135,6833813
Xenon-133m	Ar	Bq	7,134987492	18,33564375
Xenon-135m	Ar	kBq	0,407107567	1,04619375
Xenon-137	Ar	Bq	7,937360851	20,3976
Xenon-138	Ar	Bq	69,80536585	179,387325
Xylene	Ar	g	0,565100063	1,45220625
Zinc	Ar	g	13,00071607	33,40951875
Zinc-65	Ar	µBq	53,57114447	137,668275
Zinc-65	Água	mBq	132,1673546	339,6465
Zirconium-95	Ar	µBq	52,36374296	134,5654688