

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Guilherme Marcelo Zanghelini

**ESTUDO DE CENÁRIOS PARA O PÓS-USO DE UM
COMPRESSOR DE AR BASEADO NA AVALIAÇÃO DO CICLO
DE VIDA**

Influências da Fronteira do Sistema nos Resultados

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares.

Florianópolis (SC)
Março, 2013.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zanghelini, Guilherme Marcelo

Estudo de cenários para o pós-uso de um compressor de ar baseado na avaliação do ciclo de vida : influências da Fronteira do Sistema nos Resultados / Guilherme Marcelo Zanghelini ; orientador, Sebastião Roberto Soares - Florianópolis, SC, 2013.
172 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Avaliação do ciclo de vida . 3. Cenário de pós-uso. 4. Fronteiras do sistema. 5. Compressor de ar. I. Soares, Sebastião Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental pelo apoio e ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado;

Agradeço ao Professor Sebastião pela orientação e confiança a mim depositados durante o mestrado (e até antes), pelas preciosas oportunidades de crescimento pessoal e profissional e por disponibilizar o espaço e a estrutura para a realização deste trabalho;

À empresa Schulz S/A pela possibilidade de realização do projeto e pela disponibilidade de dados para o desenvolvimento desta dissertação; Aos amigos Schirlene, Márcio, Tatiane, Rodger, Vanessa e Ricardo pelo auxílio e confiança, desde meu período de estágio;

Aos colegas e amigos do CICLOG: Bruno, Camile, Cristiane, Edivan, Franciele, Francieli, Gabriela, Ian, Luiz, Morgana, Morris, Paula, Rodrigo, Vamilson e Vanessa pelas contribuições diretas e indiretas para esta dissertação, pela convivência (paciência) e pelo crescimento pessoal;

Aos amigos do PPGEA: Cris, Cuca, Deise, Edi, Isa, Jú, Ka, Mini, Papai e Débora, pela sólida amizade plantada com paz e alegria naquela lavoura do parabéns gaúcho.

Aos meus amigos do LARESO, Isa e Hugo pelos bons exemplos de serenidade e trabalho em equipe;

Ao palmeirense Edi e ao alvinegro Bruno pelo companheirismo, parceria e toda a ajuda. Por partilharmos das angústias e ‘azares’ de um ano bastante complicado;

Às REMA’s sisters: Mini e Débora pela demonstração de que força de vontade e perseverança te levam até onde você quer chegar;

Ao Opapa pelo exemplo acadêmico, embora ele não saiba;

Aos meus irmãos, Felipe e Gabriela;

À Chris, pela paciência, amor e carinho, e por apostar em mim até quando eu não apostaria.

Aos meus pais pelo apoio incondicional em todos os sentidos e por me ensinarem o caminho certo das coisas.

It is not the mountain we conquer, but ourselves.
Sir Edmund Hillary (1911 – 2008)

RESUMO

Definir o pós-uso para um produto envolve várias questões importantes. Dependendo dos processos e destinos aplicados, todo o ciclo de vida é afetado, mesmo as etapas iniciais como a obtenção de matéria-prima e a manufatura. Esta dissertação teve como objetivo identificar o melhor cenário em desempenho ambiental para o pós-uso de um produto da indústria metal mecânica, um compressor de ar, baseando-se na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A coleta de dados primários e criação dos cenários contou com o auxílio da empresa fabricante do sistema de produto. O primeiro cenário, chamado de Aterramento, avaliou a logística reversa e a disposição do compressor em aterro sanitário; O segundo cenário, Reciclagem, envolveu a logística reversa com o pós-uso encaminhado para a total reciclagem dos componentes recicláveis e aterramento das demais frações, contando para isso, com processos intermediários de desmontagem; O terceiro e último cenário, denominado Remanufatura, envolveu o retorno do equipamento ao mercado, iniciada também com o regresso do compressor à empresa, passando por processos de desmontagem e remanufatura, troca de componentes desgastados, aumentando em 05 anos o seu uso. Após a segunda vida útil, este compressor segue a destinação do cenário Reciclagem. Para complementação metodológica, esta dissertação interpretou o posicionamento das fronteiras do sistema de produto com relação às quatro principais etapas de um ciclo de vida, e as influências nos resultados finais através de uma análise de sensibilidade. A modelagem do ciclo de vida e a avaliação dos impactos de cada cenário foi realizada por meio do software SimaPro[®] englobando as categorias de impacto segundo método CML 2000 de Depleção Abiótica e Aquecimento Global, complementadas pelas categorias de Ocupação de Terra e Demanda Acumulada Total de Energia. Os resultados demonstram que o melhor cenário de pós-uso é a Remanufatura, seguido pela Reciclagem e Aterramento. Quanto ao posicionamento das fronteiras do sistema, foi demonstrado que dependendo das etapas compreendidas, influenciará na escolha do melhor cenário ao ponto de tornar o Aterramento preferível, reforçando a importância do correto estabelecimento das mesmas em um estudo envolvendo a ACV de pós-usos, principalmente remanufatura.

Palavras-chave: Compressor de Ar; Avaliação do Ciclo de Vida; ACV; Cenário de Pós-Uso; Fronteiras do Sistema.

ABSTRACT

Define the after-use destination for a product involves several important issues. Depending on the processes and destinations applied all life cycle is affected, even the earlier steps as the acquisition of raw material and manufacturing. This research aimed to identify the best environmental performance scenario for after-use options for a metal-mechanic industry product, an air compressor, based on Life Cycle Assessment (LCA) methodology. For primary data collection and scenarios creation was aided by the manufacturer of the product system. The first scenario, named Landfilling, evaluated the reverse logistics and the total disposal of the compressor in landfill; The second scenario, Recycling, involved reverse logistics with the after-use by full recycling of recyclable components and landfilling of other fractions, counting for this, with intermediate processes of disassembly; The third and final scenario, denominated Remanufacturing, involved the return of the equipment to the market, also initiated with reverse logistic to the company, passing through disassembly and remanufacturing processes, with the exchange of worn components by new ones, adding to the equipment more 05 years of use. After the second life, this compressor follows to Recycling scenario. For methodology complementation, this dissertation evaluated the positioning of the product system boundaries with respect to the four main stages of a life cycle, and the influences on the final results through a sensitivity analysis. The life cycle's modeling and assessment of the impacts of each scenario was performed using the software SimaPro[®] encompassing impact categories of Abiotic Depletion and Global Warming from CML 2000 method, complemented by categories of Land Occupation and Total Accumulated Energy Demand. The results shown that the best scenario for the after-use of an air compressor is Remanufacturing, followed by Recycling and subsequently by Landfilling. Regarding to the positioning of system boundaries, this study has demonstrated that depending on the steps comprised, the results presented high sensitivity stating the Landfilling as preferable, reinforcing the importance of the correct establishment of those in a study involving LCA of after-use scenarios.

Key-words: Air Compressor; Life Cycle Assessment; LCA; After-Use Scenario; System Boundaries.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	25
1.1.PERGUNTAS DE PESQUISA	28
1.2.OBJETIVOS	29
1.2.1.Objetivo Geral	29
1.2.2.Objetivos Específicos	29
1.3.JUSTIFICATIVA	29
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.AR COMPRIMIDO E O COMPRESSOR DE AR	31
2.2.AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	34
2.2.1.Normatização	34
2.2.2.Definição de ACV	35
2.2.3.Etapas de uma ACV	36
2.2.4.Definição de Objetivo e Escopo	37
2.2.5.Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)	39
2.2.6.Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)	39
2.2.7.Interpretação	42
2.3.GESTÃO DE RESÍDUOS	42
2.3.1.Resíduos	42
2.3.2.Compressor de Ar Obsoleto	43
2.3.3.Pós-Uso de um Compressor	44
2.3.4.Logística Reversa	48
2.4.ACV DO PÓS-USO DE COMPRESSORES	50
3.METODOLOGIA	53
3.1.CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO	53
3.2.DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE PRODUTO	54
3.3.DEFINIÇÃO DA UNIDADE FUNCIONAL E ALOCAÇÃO	56

3.4.CENÁRIOS DE PÓS-USO _____	56
3.4.1.Cenário De Logística Reversa _____	58
3.4.2.Cenário Aterro Sanitário (AS) _____	60
3.4.3.Cenário Reciclagem (RC) _____	62
3.4.4.Cenário Remanufatura (RM) _____	64
3.5.FRONTEIRAS DO SISTEMA _____	67
3.6.COLETA DE DADOS _____	73
3.7.AVALIAÇÃO DE IMPACTO _____	74
3.8.INTERPRETAÇÃO _____	76
3.9.REQUISITOS DOS DADOS _____	76
3.10.PRESSUPOSTOS _____	77
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	79
4.1.INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA _____	79
4.1.1.Aquisição de Matérias-Primas _____	79
4.1.2.Manufatura _____	80
4.1.3.Uso e Manutenção _____	81
4.1.4.Pós-Uso _____	83
4.2.AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA _____	94
4.2.1.Análise Preliminar Geral _____	95
4.2.2.Cenário Logística Reversa _____	98
4.2.3.Cenário AS _____	100
4.2.4.Cenário RC _____	104
4.2.5.Cenário RM _____	107
4.2.6.Comparação dos Cenários _____	112
4.2.7.Análise de Sensibilidade (Variação das Fronteiras) _____	116
4.3.ANÁLISE CRÍTICA _____	124
5.CONCLUSÕES _____	127

6.RECOMENDAÇÕES _____	129
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	130
APÊNDICE 1 _____	143
APÊNDICE 2 _____	149
APÊNDICE 3 _____	151
APÊNDICE 4 _____	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Normatização da ACV no Brasil.	35
Tabela 2. Linha de raciocínio para a AICV segundo a categoria de impacto ambiental de aquecimento global.	40
Tabela 3. Ficha técnica do compressor de ar CSL20BR.	55
Tabela 4. Concentração industrial brasileira, localizações dos centros de recebimento regionais e distâncias assumidas para a ACV.	60
Tabela 5. Processos elementares de manufatura do sistema de produto: compressor CSL 20BR.	80
Tabela 6. Dados de uso do Sistema de Produto para um funcionamento de 40.000 horas.	82
Tabela 7. Consumos e gerações da etapa de uso do compressor.	82
Tabela 8. Peças trocadas, conforme projeção de manutenção e considerando a vida útil proposta.	83
Tabela 9. Estimativa de porcentagem por região de produto obsoleto recebido nos centros de recebimento regionais e distâncias assumidas.	84
Tabela 10. Somatório das frações das matérias-primas empregadas no compressor de ar.	85
Tabela 11. Distâncias e transportes assumidos para a destinação final do Cenário AS.	86
Tabela 12. Processos de desmontagem e seus consumos nos cenários RC e RM.	86
Tabela 13. Consumos do processo único de desmontagem do compressor.	87
Tabela 14. Frações refundidas, recicladas, aterradas e demais adoções para o Cenário RC.	88
Tabela 15. Distâncias e transportes assumidos para a destinação final do Cenário RC.	89
Tabela 16. Componentes não aproveitáveis para a remanufatura do compressor (RM) e a destinação proposta.	90
Tabela 17. Componentes reaproveitáveis para a remanufatura do compressor no Cenário RM.	91
Tabela 18. Entradas e saídas do processo de remanufatura para RM.	93
Tabela 19. Impactos ambientais gerados pela logística reversa por rota.	98
Tabela 20. Impactos gerados segundo etapas do ciclo de vida do produto.	100
Tabela 21. Impactos gerados segundo etapas do ciclo de vida do produto, exceto fase de Uso e Manutenção.	102

Tabela 22. Impactos ambientais gerados segundo etapas do ciclo de vida.....	105
Tabela 23. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida exceto fase de Uso e Manutenção.	105
Tabela 24. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida do produto.....	108
Tabela 25. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida do produto, exceto Uso e Manutenção.....	108
Tabela 26. Geração de impacto ambiental para os Cenários.....	112
Tabela 27. Geração de impacto ambiental para os Cenários, sem a fase de Uso e Manutenção.....	113
Tabela 28. Impactos ambientais conforme 1ª fronteira (somente a etapa de pós-uso).....	116
Tabela 29. Valores totais dos cenários conforme 2ª fronteira.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principais de um compressor alternativo.....	33
Figura 2. Estágios do ciclo de vida de um Sistema de Produto.....	36
Figura 3. Etapas de uma ACV e suas relações	36
Figura 4. Exemplo de Primeiro e Segundo Planos.....	38
Figura 5. Exemplo de processo elementar e suas entradas e saídas.	39
Figura 6. Foco de atuação da logística reversa, com ênfase no pós-consumo	48
Figura 7. Áreas de atuação e etapas da logística reversa.....	49
Figura 8. Opções para o fechamento do “loop”, incluindo a fase de uso	52
Figura 9. Localização dos municípios de Joinville (Schulz S/A) em verde e de Florianópolis (UFSC) em vermelho.....	54
Figura 10. Compressor Alternativo Lubrificado CSL 20BR=	55
Figura 11. Fluxograma simplificado da rota de gestão final, com a variação para cada cenário definido.	58
Figura 12. Mapa demonstrativo de vias de logística reversa.....	59
Figura 13. Fluxograma simplificado do Cenário AS.....	61
Figura 14. Localização da empresa e do aterro sanitário	62
Figura 15. Fluxograma simplificado do Cenário RC e destinações finais.	63
Figura 16. Localização dos setores de recebimento e de fundição em “1”; e Localização da empresa e fabricante dos motores (município de Jaraguá do Sul) em “2”.....	64
Figura 17. Fluxograma simplificado do Cenário RM e destinações finais.....	66
Figura 18. Posicionamento da fronteira do Sistema (em vermelho), para a análise e escolha do cenário de melhor disposição final. * Etapa da variação dos cenários.	68
Figura 19. Ciclos de vida para o cenário de pós-uso AS.....	69
Figura 20. Ciclos de vida conforme o cenário de pós-uso RC.	70
Figura 21. Ciclos de vida para o cenário de pós-uso RM.....	70
Figura 22. Primeira delimitação da fronteira (sem incluir produto evitado).....	71
Figura 23. Segunda delimitação da fronteira (contemplando o produto evitado).....	72
Figura 24. Terceira delimitação da fronteira.	72
Figura 25. Porcentagens do produto obsoleto recebido em cada região para o cenário de logística reversa proposto.....	84

Figura 26. Valores normalizados para a geração de impactos dos cenários.	95
Figura 27. Valores normalizados para a geração de impactos dos cenários para cada categoria, sem a fase de uso e manutenção.....	97
Figura 28. Participações nos impactos ambientais das rotas de logística reversa relativo ao total emitido para todas as categorias avaliadas.	99
Figura 29. Contribuição de cada etapa do ciclo de vida por categorias de impacto ambiental.	101
Figura 30. Contribuição de cada etapa do ciclo de vida por categorias de impacto, sem a etapa de uso e manutenção.	103
Figura 31. Participação na geração de impactos ambientais das etapas do ciclo de vida do compressor (exceto a fase de uso e manutenção). Frações negativas representam impactos evitados, e portanto, impactos positivos.	106
Figura 32. Contribuição das etapas do ciclo de vida do compressor por categorias de impacto (exceto a fase de uso e manutenção do compressor). Frações negativas representam impactos evitados.	109
Figura 33. Geração de impactos ambientais para os três cenários analisados, sem a fase de uso e manutenção.	114
Figura 34. Impactos gerados pelos cenários conforme 1ª variação da posição da fronteira do sistema.	118
Figura 35. Impactos gerados pelos cenários conforme 2ª variação da posição da fronteira do sistema.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
ADF – *Abiotic Depletion Factor*
AICV – Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
Art. – Artigo (legislação)
AS – Cenário de Aterramento Sanitário
BA – Estado da Bahia
Cap. – Capítulo (legislação)
CED - *Cumulative Energy Demand*
CICLOG - Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida
CML – *Institute of Environmental Sciences/Universiteit Leiden*
CO – Região Centro Oeste
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes
EUA – Estados Unidos da América
GEE – Gases do Efeito Estufa
GWP100 – *Global-Warming Potencial* (Horizonte de 100 anos)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV – Inventário de Ciclo de Vida
Inc. – Inciso (legislação)
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO – *International Organization for Standardization*
LOG. R. – Logística Reversa
M.P. – Matérias-Primas (aquisição)
MRI - *Midwest Research Institute*
MS – Estado de Mato Grosso do Sul
N – Região Norte
NBR – Norma Brasileira
NE – Região Nordeste
PA – Estado do Pará
P+L – Produção mais Limpa
PAG – Potencial de Aquecimento Global
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPCS – Plano de Produção e Consumo Sustentável
PPGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
RC – Cenário de Reciclagem
REPA - *Resource and Environmental Profile Analysis*
REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
RM – Cenário de Remanufatura

S – Região Sul
S/A – Sociedade Anônima
SAIC - *Scientific Applications International Corporation*
SC – Estado de Santa Catarina
SE – Região Sudeste
SETAC - *Society for Environmental Toxicology and Chemistry*
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SP – Estado de São Paulo
SUASA - Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária
TR – *Technical Report*
TS - *Technical Specification*
U.F. – Unidade Funcional
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UNEP – *United Nations Environment Programme*
USEPA – *United States Environmental Protection Agency*
USO/MAN. – Uso e manutenção

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

% – Porcentagem
°C – Graus Celsius
µm – Micrômetro
ABS – Acrilonitrila butadieno estireno (*Acrylonitrile butadiene styrene*)
Bar – Unidade de pressão (próximo 10^5 Pa)
CFCs – Clorofluorcarbonetos
CH₄ – Metano
CO₂ – Dióxido de Carbono
CO₂ eq. – Dióxido de Carbono equivalente
HCFC – Hidroclorofluorcarbonetos
HFCs – Hidrofluorcarboneto
hp – *Horsepower*
kg – Quilograma
km – Quilômetro
kW – Kilowatt
kWh – Kilowatt hora
L – Litro
L/min. – Litro por minuto
m – Metro
m²·a – Metro quadrado ano
m³ – Metro cúbico
MJ – Megajoule
MJ eq. – Megajoule equivalente
mL – Mililitro
mm – milímetro
mm² – milímetro quadrado
n° – Número
N₂O – Óxido Nitroso
PE – Polietileno
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade
PFCs – Perfluorcarbonetos
PVC – Policloreto de Vinil (*Polyvinyl chloride*)
RPM – Rotações por minuto
Sb eq. – Antimônio equivalente
SF₆ – Hexafluoreto de Enxofre
SO₂ – Dióxido de Enxofre
t·km – Tonelada quilômetro
V – Volume
W/m² – Watt por metro quadrado

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, adotou-se em todo o mundo padrões de produção e consumo incompatíveis com a capacidade dos ecossistemas absorverem cargas ambientais e de regeneração das reservas de recursos. O crescimento da população humana está inteiramente ligada ao aumento do consumo de recursos naturais, de energia, uso de terras, bem como da geração de resíduos e demais emissões. Com a revolução industrial, como sintetiza McLamb (2011), o crescimento exponencial da população levou às exigências, também exponenciais, dos recursos, e por conseguinte da geração da poluição.

Tal panorama permanece indiferente até o momento em que começa-se a associá-lo às ameaças globais com relação ao meio ambiente. A relação entre o consumo e a geração de impacto ambiental apontada por Wenzel, Hauschild e Alting (2001) foi primeiramente descrita somente durante a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento, conhecido também como RIO - 92, a qual descreveu no documento Agenda 21 que "as principais causas da deterioração ininterrupta do meio ambiente mundial são os padrões insustentáveis de consumo e produção" (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 1992). Paul Burkett (1999) complementa expondo a tendência deste sistema ou situação em consumir e degradar o meio ambiente ao ponto de ameaçar a própria existência humana.

Anteriormente, em meados dos anos 60, questões referentes à poluição e setores industriais começaram a ser discutidas, com importantes marcos no decorrer das décadas seguintes como a Conferência de Estocolmo no ano de 1972, alertando os países sobre os efeitos da poluição industrial e urbana e sobre a necessidade de se desenvolver novas legislações, marcos regulatórios e agências de controle ambiental. Termos como eco-desenvolvimento e sustentabilidade começaram a surgir, culminando com o conceito de Desenvolvimento Sustentável.

A definição de Desenvolvimento Sustentável apresenta algumas pequenas diferenças na literatura, no entanto, são todas derivadas de um mesmo princípio. A proposição básica, segundo Montibeller (2001), é a eficiência econômica associada a eficácia social e ambiental, o que significa a melhoria da qualidade de vida das populações atuais, sem comprometer as possibilidades das gerações futuras.

Após a RIO - 92, os debates sobre o desenvolvimento sustentável começam a abordar mais frequentemente os padrões de produção e

consumo surgindo conceitos como a Produção Mais Limpa (P+L) e Consumo e Produção Sustentáveis (SCP¹) que objetivam alcançar o equilíbrio entre o desenvolvimento constante e as necessidades globais de assimilar os impactos, sem afetar a qualidade ambiental e de vida.

O SCP foi definido pelo Ministro do Meio Ambiente da Noruega, durante Simpósio de Oslo, em 1994, como:

O uso de serviços e produtos, que atendam às necessidades básicas e e melhoram a qualidade de vida enquanto minimizam o uso de recursos naturais e materiais tóxicos, bem como as emissões de resíduos e poluentes ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço de forma a não comprometer as necessidades das gerações futuras.

Basicamente uma variação do conceito de desenvolvimento sustentável com aplicação voltada à indústria e ao consumidor.

Consequentemente, o aumento da consciência humana com relação a estas questões estritamente ligadas às cadeias de produção de bens de consumo, meio ambiente e fontes energéticas, já possui reflexos no ambiente dos negócios contemporâneos e na legislação dos governos (WANG; GUPTA, 2011).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) do ano de 2010, em seu capítulo 2, Art. 2º, define padrões sustentáveis direcionados à produção e consumo de uma forma bastante semelhante ao Ministro Norueguês:

Produção e consumo de bens e serviços de forma a atender as necessidades das atuais gerações e permitir melhores condições de vida, sem comprometer a qualidade ambiental e o atendimento das necessidades das gerações futuras (BRASIL, 2010 a / Lei nº 12,305 de 02 de agosto de 2010).

Como complementa Sawyer (2002) isso inclui a utilização, aquisição e descarte de produtos e de serviços, em vários estágios do ciclo de vida, o que nos posiciona para os relatórios da UNEP (2009; 2010), os quais indicam a maneira de desenvolver SCP, por meio do "Pensamento em Ciclo de Vida²" principalmente para promover a gestão sustentável dos recursos e alcançar a eficiência ao longo de ambas as fases de produção e de consumo. O pensamento em ciclo de vida é uma

¹ do inglês “*Sustainable Consumption and Production*”.

² do inglês “*Life Cycle Thinking*”

expansão do foco tradicional no local de produção e nos processos de fabricação e incorpora vários aspectos ao longo do inteiro ciclo do produto do berço ao berço (UNEP, 2010), base para o estabelecimento da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV por sua vez, é uma metodologia que compila as entradas e saídas de um produto ou serviço e quantifica os impactos ambientais potenciais desde a aquisição de matérias-primas até a disposição final (BAUMANN; TILLMAN, 2004; GUINEÉ *et al.*, 2002; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 2001; CURRAN, 1996; SETAC, 1993).

Hauschild, Jeswiet e Alting (2005) apontam que se uma Indústria tem o objetivo de operar de forma sustentável precisa pensar na cadeia de produto inteiro, e cada vez mais está sendo direcionada para essa perspectiva, devido à recente legislação como a Diretriz da União Européia 2002/96/EC (UNIÃO EUROPÉIA, 2003) e a PNRS (BRASIL, 2010a), reflexo de um aumento na demanda de produtos ambientalmente amigáveis por parte dos consumidores (WANG; GUPTA, 2011; HAUSCHILD; JESWIET; ALTING, 2005). Em virtude destas imposições legais, muitas indústrias hoje têm a necessidade de incorporar questões ambientais em sua cadeia de produção, como corroboram Wang e Gupta (2011), fazendo com que sejam responsáveis por todo o ciclo de vida do produto.

Com relação ao pós-uso de equipamentos, o modo encontrado para começar a modificar o sistema de consumo e produção é pela responsabilização compartilhada tanto do consumidor quanto do produtor (um dos princípios da PNRS e da Diretriz Européia), como já acontece com alguns fabricantes, que são responsabilizados pela logística reversa e final de vida de produtos, como por exemplo: pilhas, baterias, agrotóxicos, lubrificantes, pneus, produtos eletroeletrônicos (BRASIL, 2010a / Art. 33). Este fato, segundo Emblemsvag (2003) refletirá nas companhias que serão forçadas a receber seus produtos obsoletos e gerenciar o seu pós-uso, desde a logística reversa até o descarte final. O mesmo autor afirma que outras empresas poderão incorporar o recebimento de produtos, de maneira voluntária, porque pode ser um bom negócio. Significa que o ciclo de vida inteiro passa a ser responsabilidade do fabricante, refletindo em etapas precedentes à própria fabricação do produto, como a aquisição de matérias-primas e fornecimento de componentes.

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) também é estimulada pela Política Nacional de Resíduo Sólidos (BRASIL, 2010a / Cap. 2; Art. 7º. inc. XIII) que a cita como metodologia de gestão

ambiental e reforçada pela Resolução nº 3 de 22 de abril de 2010 do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior que indica a “necessidade de se inserir e tornar efetiva a Avaliação do Ciclo de Vida como um instrumento de apoio à sustentabilidade ambiental no Brasil” (BRASIL, 2010b, p. 1).

A implementação de uma ACV, conforme a norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), pode subsidiar: a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental em pontos do ciclo de vida; o nível de informação para a tomada de decisões, o desenvolvimento e escolha de indicadores de desempenho ambiental e o marketing ambiental.

Com base nesta metodologia, tendo em vista as legislações recentes, a presente dissertação buscou identificar o melhor cenário de pós-uso para um equipamento metal-mecânico, um compressor de ar, envolvendo todas as etapas do ciclo de vida deste produto, desde a aquisição da matéria-prima até o final do ciclo. Os cenários analisados e comparados compreendem a logística reversa, disposição em aterro sanitário, a reciclagem e a re-manufatura do equipamento.

Dentro da linha de pesquisa de Gestão Ambiental de Organizações do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da UFSC, esta dissertação pretende complementar parte da discussão metodológica iniciada pelo Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG). Benedet Júnior (2007) abordou a temática da análise de incertezas aplicadas a estudos de ACV. Sousa (2008) avaliou os métodos de normalização enquanto que Ramírez (2009) dissertou a respeito dos métodos de alocação existentes. Alvarenga (2010) estudou os métodos de Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida. Esta dissertação mais especificamente realizará uma análise de sensibilidade, alterando o posicionamento das fronteiras do sistema de produto e avaliando as influências nos resultados para a escolha do cenário de melhor desempenho ambiental para o fim de vida do compressor de ar, contribuindo assim, para um melhor entendimento de parte da metodologia de ACV.

1.1. PERGUNTAS DE PESQUISA

Com base nas informações do item anterior, alguns questionamentos surgem, principalmente em relação ao posicionamento da indústria na tomada de decisões voltadas ao pós-uso de um produto complexo.

Qual é a influência do posicionamento das fronteiras do sistema com relação às etapas do ciclo de vida (incluindo ou não a aquisição de matérias-primas, manufatura, uso e descarte), nos resultados finais de uma ACV voltada para a escolha de cenários de pós-uso?

Qual é a melhor opção existente para o final de ciclo de vida (pós-uso) do ponto de vista ambiental para um equipamento como o compressor de ar?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Identificar o cenário de melhor desempenho ambiental para o pós-uso de um compressor de ar produzido pela empresa Schulz S/A, envolvendo todo o ciclo de vida do produto, desde a aquisição das matérias-primas e manufatura do mesmo até o seu uso e descarte.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Modelar e inventariar cenários de pós-uso do compressor de ar envolvendo as possibilidades de aterramento, reciclagem e remanufatura.

- Comparar os impactos ambientais gerados por cada cenário, contabilizados e caracterizados pelo método *CML 2000 Baseline* adaptado.

- Indicar os principais pontos de interesse dentro do sistema produtivo associados aos cenários;

- Demonstrar as influências nos resultados finais, do posicionamento das fronteiras do sistema pelo uso da análise de sensibilidade.

1.3. JUSTIFICATIVA

Um compressor de ar acionado por motor elétrico, depois de sua fase de utilização, pode ser classificado como um Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico (REEE³), pela categoria de ferramenta eletroeletrônica e, portanto, deve ter uma correta destinação final ou destino (UNIÃO EUROPÉIA, 2003). "A diretriz REEE essencialmente aplica-se a todos os equipamentos que possam ser conectados a um circuito elétrico ou que operam em baterias. Ele inclui

³ Em inglês *Waste Electric Electronic Equipment* (WEEE)

aparelhos domésticos pequenos e grandes" (KUMAR; PUTNAM, 2008, p. 306; UNIÃO EUROPEIA, 2003).

Franco e Lange (2011) explicam que a geração de REEE em particular, estão em processo de plena expansão (inclusive nos países em desenvolvimento como o Brasil). A redução dos preços de venda atrelada a crescente inovação tecnológica e a diminuição do tempo de vida útil são fatores contribuintes para este aumento. Uma estimativa realizada por Portugal e Dantés (2010) aponta uma produção de aproximadamente 240 mil toneladas de REEE para o ano de 2010 no Brasil, incluindo produtos domésticos e industriais. Com relação à compressores de ar, somente o modelo analisado neste estudo possui uma quantidade média de 4.200 unidades vendidas todos os anos, o que corresponde em massa a aproximadamente 744 toneladas⁴, que precisam de um destino final adequado.

A preocupação quanto aos impactos ambientais desses resíduos se justifica pelo fato de que muitos dos REEE são descartados indevidamente (FRANCO; LANGE, 2011), somados ao seu potencial de contaminação ambiental (NATUME; SANT'ANNA, 2011).

As leis recentes posicionam os fabricantes como responsáveis pela recolha, tratamento, valorização e eliminação de REEE, sem encargos para os consumidores, como a PNRS (BRASIL, 2010a) no Brasil e a Diretriz Européia de 2003 (UNIÃO EUROPEIA, 2003). A indústria passará, em um período relativamente curto de tempo, a ter que gerir o passivo ambiental criado por seus produtos obsoletos. Essas leis descrevem a redução de resíduos na fonte como primeira medida para garantir a sustentabilidade, posicionando a remanufatura como destino final preferível. A reciclagem é citada após a remanufatura, mas também preferível. Embora a disposição em aterro figure entre as últimas destinações recomendadas, ainda trata-se de uma possibilidade permitida por estas leis.

Tais questões abrem margem para a necessidade de identificar melhores rotas de logística reversa e pós-uso para o passivo formado por estes resíduos, começando com o fornecimento de informações relativas à cenários possíveis e quantificação de impactos ambientais associados aos mesmos.

Este estudo justifica-se ainda pela abordagem "*cradle to the grave*" (berço ao túmulo), que permite verificar as influências do posicionamento das fronteiras do sistema de produto sobre os resultados

⁴ Setor de Engenharia de Produtos e Setor de Controle de Processos, Empresa Schulz S/A, 2010.

da análise, conforme a inclusão ou exclusão das etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AR COMPRIMIDO E O COMPRESSOR DE AR

O ar comprimido é energia na forma de pressão (SCHULZ S/A, 2009), usado para uma variedade de serviços industriais. Os pesquisadores Soares e Bloch (1998) apontam que sua função básica é a de aumentar o nível de pressão do gás a ser comprimido. Empregado como forma de condutor para esta energia, assim como outros condutores como fluídos em sistemas hidráulicos e energia elétrica em sistemas elétricos. Pode ser armazenado e transportado por tubulações, assim como executar trabalhos através da conversão de energia em motores e cilindros (BOSCH, 2008).

O ar comprimido, como aponta Schulz S/A (2009) é obtido pela redução volumétrica, de forma mecânica dos gases atmosféricos, ou de outras formas de compressão e pode ser armazenado mantendo sua plena capacidade energética de forma constante. Esta redução mecânica acontece basicamente por meio da transferência de energias, por exemplo, compressores são usados para a geração de ar comprimido, transformando a energia elétrica em energia pneumática (METALPLAN, 2010). Existem diferentes tipos de equipamento de acordo com este mecanismo de compressão ou modo de compressão.

De acordo com seus princípios funcionais, Bosch (2008) divide os compressores de ar comprimido em: compressores dinâmicos e compressores de deslocamento positivo. Entretanto, Da Costa (1978) descreve e classifica de forma mais generalizada em função da natureza do movimento apresentado por esta máquina, e podem ser divididos entre alternativos e rotativos.

Seguindo a classificação de Bosch (2008) os compressores dinâmicos (ou turbocompressores) são baseados exclusivamente no princípio rotacional de trabalho. São os compressores de fluxo axial e de fluxo radial. Estes equipamentos possuem uma peça rotativa munida de pás que transfere ao ar a energia recebida de um acionador. Essa transferência de energia se faz em parte na forma cinética e em parte na forma de calor efetuando o processo de compressão de maneira contínua.

Os compressores de deslocamento positivo ou volumétrico trabalham com ajuda de rotação assim como do movimento alternado do pistão. Nesses compressores, a elevação de pressão é alcançada por meio da redução do volume ocupado pelo ar (BOSCH, 2008). Na operação dessas máquinas podem ser identificadas diversas fases, que constituem o ciclo de funcionamento: inicialmente, certa quantidade de ar é admitida no interior de uma câmara de compressão, que então é fechada e sofre redução de volume. Finalmente, a câmara é aberta e o ar liberado para consumo. Trata-se de um processo intermitente, no qual a compressão propriamente dita é efetuada em sistema fechado, isto é, sem qualquer contato com a sucção e a descarga. Os tipos de compressores mais usados nesta categoria são: compressores de palhetas, compressores de parafuso, compressores de lóbulo e compressores de anel líquido, compressores de pistão e compressores de diafragma.

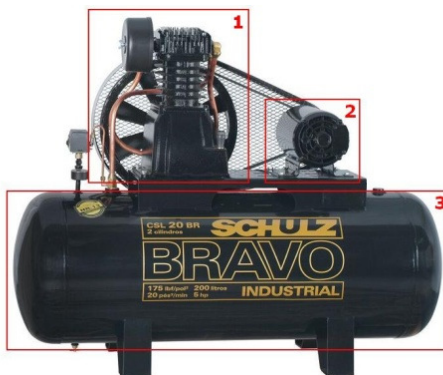
Dentre os compressores de deslocamento positivo, o tipo mais empregado como apontado pelos autores Brown (2005), Greenough (2000) e Soares e Bloch (1998) são os modelos alternativos, como o compressor de pistão. Isto se deve ao fato de possuírem a capacidade de adaptação a uma vasta gama de carga, velocidade, condições e proporções de pressão, e também porque são menos dispendiosos e mais fáceis de manter e operar em comparação com os compressores rotativos de parafuso. No entanto, os modelos rotativos demonstram melhor eficiência e solidez (GREENOUGH, 2000), e estão pouco a pouco substituindo compressores alternativos em aplicações industriais e em sistemas de refrigeração (STOSIC; SMITH; KOVACEVIC, 2003).

Segundo a Empresa Schulz S/A (2009), baseando-se no modelo alternativo lubrificado, equipamento em análise para esta ACV, Zanghelini (2010) dividiu um compressor basicamente em três partes principais: unidade motriz, unidade de compressão de ar e reservatório de ar (Figura 1).

Figura 1. Componentes principais de um compressor alternativo. Fonte: Zanghelini, (2010).

Legenda

- 1 - Unidade Compressora;
- 2 - Unidade Motriz;
- 3 - Reservatório;



A unidade compressora é o principal mecanismo onde ocorre efetivamente a admissão e compressão do ar. Pode ser de mono estágio ou multi-estágios, de simples ou duplo efeito e ainda, lubrificado na porção inferior ou isento de óleo (utilização de material antiaderente como o teflon) (SCHULZ S/A, 2009). Enquanto que a unidade motriz é um motor, na maioria das vezes elétrico, podendo ser também à combustão interna. O reservatório armazena o ar comprimido e equaliza a sua pressão para posterior uso. Tem como função também servir como base ou lastro para a unidade motriz e unidade de compressão (SCHULZ S/A, 2009).

Com relação ao impacto ambiental gerado por um produto como o compressor de ar (especificamente o alternativo lubrificado), em todo o seu ciclo de vida, pode-se destacar alguns pontos importantes. Como qualquer outro equipamento manufaturado a partir de matérias-primas basicamente metálicas (ferro-fundido, aço, cobre e alumínio), associa-se a este sistema de produto os impactos da mineração e processos de beneficiamento da matéria-prima virgem, como por exemplo, a formação do aço por meio da fundição de ferro (óxido de ferro) e carbono (carvão).

Com relação aos processos de remanufatura, o compressor passa por etapas com relativamente pequena geração de impactos. São

processos de soldagem, calandragem, moldagem, corte, pintura e demais montagens, que envolvem consumos energéticos e geração de resíduos, mas de menor magnitude se comparadas à aquisição das matérias-primas.

O grande impacto ambiental associado ao ciclo de vida de compressores está ligado à fase de uso do mesmo, em virtude do grande consumo energético durante o período atribuído à sua vida útil. Diversos estudos apontam a fase de uso como detentora de maiores impactos ambientais no ciclo de vida de compressores ou de sistemas semelhantes como as geladeiras e alguns outros eletrodomésticos de porte médio (ELIJOŠIŪTĖ; VARŽINSKAS, 2010; CULLEN; ALLWOOD, 2009; OTTO; RUMINY; MROTZEK, 2006; JOHNSON, 2004; KLOS, 2000; NERI *et al.*, 2000a). No caso deste compressor de ar, existe ainda o consumo e reposição de óleo lubrificante em seu componente pistão durante a fase de uso, contemplando o impacto da obtenção desta matéria-prima, bem como da geração de resíduos por parte das embalagens de óleo e a própria evaporação e descarte do remanescente.

Por fim, existe também o impacto ambiental que deve ser associado ao fim de vida ou pós-uso deste equipamento, objeto principal de análise deste estudo, o qual dependendo da destinação pode ser maior ou menor.

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.2.1. Normatização

A Tabela 1 descreve a normatização existente para ACV no exterior e o equivalente para o território nacional, criado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Não existem ainda traduções realizadas pela ABNT para os relatórios técnicos criados pela ISO.

Tabela 1. Normatização da ACV no Brasil.

Documento	Descrição	Equivalente ABNT
ISO 14040	Define os princípios da metodologia, seus conceitos e estrutura (ISO, 2006a).	NBR ISO 14040 Princípios e Estrutura (ABNT, 2009a)
ISO 14044	Aborda a estrutura metodológica, apresentando requisitos e diretrizes para a realização de um estudo (ISO, 2006b).	NBR ISO 14044 Requisitos e Orientações (ABNT, 2009b)
ISO TR 14047	Apresenta exemplos de aplicação, especificamente sobre a etapa de avaliação do impacto (ISO, 2003).	-
ISO TS 14048	Traz considerações quanto ao formato de apresentação dos dados (ISO, 2002).	-
ISO TR 14049	Fornece exemplos de aplicação (ISO, 2000).	-

Adaptado de Sousa (2008).

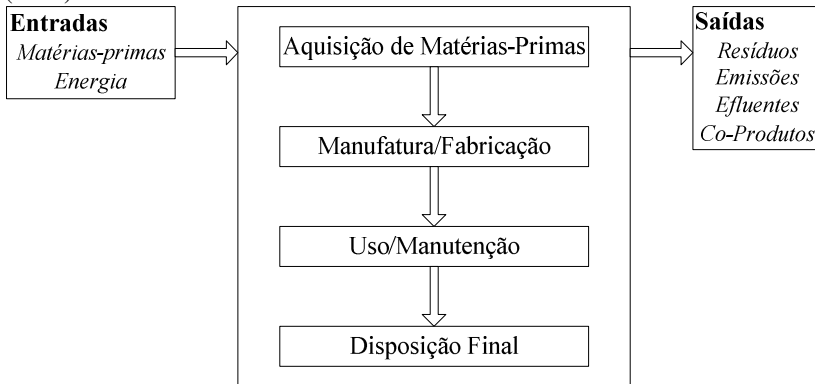
2.2.2. Definição de ACV

Dois conceitos importantes para entender a definição de ACV são o ‘Ciclo de Vida’ e o ‘Sistema de Produto’.

A norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), define Ciclo de Vida como “estágios consecutivos e encadeados de um Sistema de Produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”. Para Ciambrone (1997), o conceito de ciclo de vida usado na ACV significa simplesmente que as entradas do ciclo (como energia, materiais, etc.) e as saídas (resíduos, energia, co-produtos) são analisadas para cada etapa de vida do produto ou serviço. Enquanto isso, ‘Sistema de Produto’ se refere ao conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produtos, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o seu ciclo de vida (ABNT, 2009a).

A Figura 2 ilustra os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados em uma ACV e as típicas entradas/saídas medidas do Sistema de Produto analisado (USEPA, 2006).

Figura 2. Estágios do ciclo de vida de um Sistema de Produto. Fonte USEPA (2006).

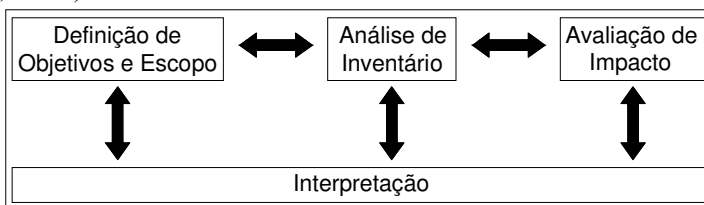


Vários autores definem a ACV basicamente como uma compilação e avaliação destas entradas e saídas e os impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida deste sistema de produto (ABNT, 2009b; BAUMANN; TILLMAN, 2004; FERREIRA, 2004; CHEHEBE, 2002; GUINEÉ *et al.*, 2002; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 2001; CURRAN, 1996; SETAC, 1993).

2.2.3. Etapas de uma ACV

A ABNT (2009a) apresenta a estrutura metodológica para avaliação do ciclo de vida, que consiste em definir quatro fases fundamentais: (1) Objetivo e Escopo; (2) Análise de Inventário de Ciclo de Vida; (3) Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida; e (4) Interpretação. Estas etapas estão interligadas entre si de maneira ilustrada pela Figura 3.

Figura 3. Etapas de uma ACV e suas relações. Adaptado da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a).



2.2.4. Definição de Objetivo e Escopo

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) posiciona que a definição do objetivo deve incluir, de forma clara, os propósitos pretendidos e conter todos os aspectos considerados relevantes para direcionar as ações que deverão ser realizadas. Conforme a norma, esta fase deve contemplar: (1) A aplicabilidade pretendida; (2) As razões da realização deste estudo; (3) O público-alvo;

O escopo refere-se à aplicabilidade geográfica, técnica e histórica do estudo: de qual lugar virão os dados, como atualizar o estudo, como a informação será manipulada e em que os resultados serão aplicados (USEPA, 2006). A norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) aponta: (1) Sistema de produto a ser estudado; (2) Definição dos limites do sistema; (3) Definição das unidades do processo; (4) Estabelecimento da função e da unidade funcional do sistema; (5) Procedimentos de alocação; (6) Requisitos dos dados; (7) Hipóteses e limitações; (8) Avaliação de impacto e a metodologia a ser adotada; (9) A fase de interpretação, e a metodologia a ser adotada; (10) Tipo e formato de relatório necessário ao estudo; (11) Definição dos critérios para revisão crítica, se necessária.

Dois definições de extrema importância são: a Unidade Funcional e a(s) Fronteira(s) ou Limite(s) do Sistema. Aplicar corretamente a U.F. de uma ACV é a chave para se desenvolver um estudo sem ambiguidades, principalmente em estudos comparativos, em que os sistemas devem ser comparados de acordo com a mesma unidade funcional (SETAC, 1993). Define-se como “desempenho quantificado de um sistema de produto para a utilização como uma unidade de referência” (ABNT, 2009b). A Alocação é a “repartição de fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produtos” (ABNT, 2009a).

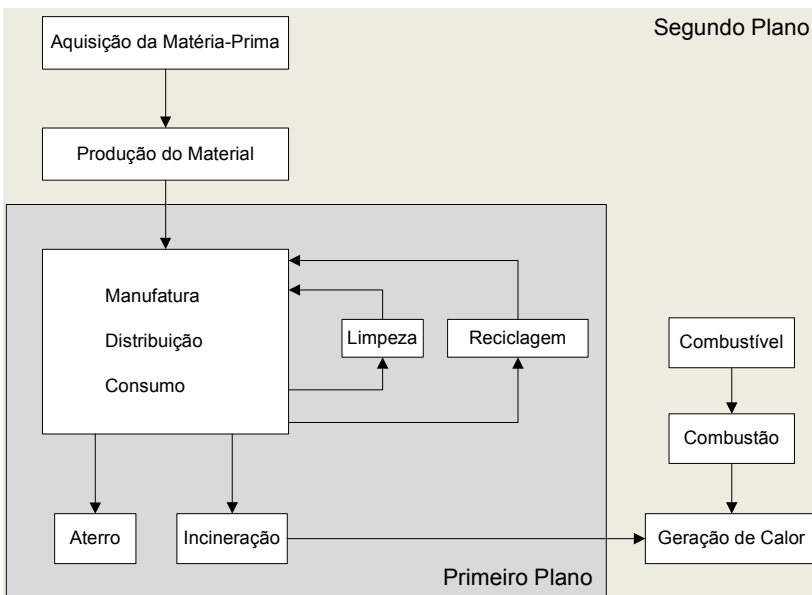
A definição de Fronteira do Sistema utilizada pela norma é: conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte do Sistema de Produto (ABNT, 2009b). SETAC (1993) define a fronteira como um limite de separação entre o Sistema dos seus arredores, denominado de ambiente do Sistema. As entradas são advindas deste ambiente, e as saídas o têm como destino. O sistema e suas fronteiras devem ser definidos com relação aos seus aspectos específicos, dados, rotas de distribuição, funções, etc.

Em estudos de ACV para o gerenciamento de resíduos, as fronteiras do sistema se mostram de complexo entendimento (CURRAN, 1996). O fim de vida de um produto pode ser comumente

entendido como quando ocorre o retorno de todos os resíduos do sistema para a terra. Contudo, Curran (1996) explica que quando a gestão envolve reciclagem ou incineração com recuperação de calor, a fronteira deve ser estendida, de modo que os benefícios desta destinação possam ser contabilizados. Em outras palavras, a reciclagem deve ultrapassar as fronteiras desta etapa e associando-a à aquisição de matéria-prima virgem e à manufatura.

Baumann e Tillman (2004) explicam que em estudos que requeiram alterações ou variações no escopo, uma subdivisão do sistema de produto em sistemas de primeiro e segundo plano pode vir a ser útil. As autoras descrevem o sistema de primeiro plano como aquele que compreende os processos sob influência dos tomadores de decisão, enquanto que o de segundo plano compreende os demais processos modelados. A Figura 4 apresenta uma exemplificação dos planos divididos.

Figura 4. Exemplo de Primeiro e Segundo Planos. Adaptado de Baumann e Tillman (2004).



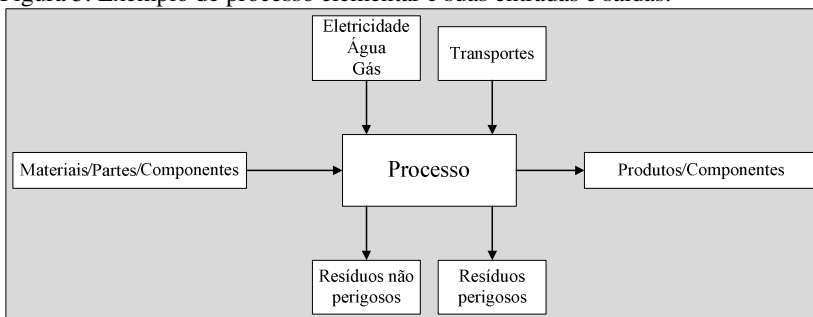
A localização da linha de encontro entre os planos será a fronteira variada na análise de sensibilidade proposta por esta dissertação, envolvendo ou não as quatro etapas principais de uma ACV.

2.2.5. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

O inventário é a compilação e quantificação das entradas (energias, matérias-primas, etc.) e saídas (emissões, resíduos, co-produtos, etc.) de um sistema de produto. (SAIC, 2006). É regida e organizada pelas definições de objetivo e escopo assumidas na primeira etapa da ACV, conforme NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), como a Unidade Funcional e as Fronteiras do Sistema.

Quanto à Coleta de Dados para a construção do Inventário, trata-se de uma das atividades de maior consumo de tempo em um estudo de avaliação do ciclo de vida e podem ter origem em medições, cálculos ou estimativas de forma a quantificar as entradas e saídas para cada processo elementar (Figura 5) dentro das fronteiras do Sistema (ABNT, 2009b).

Figura 5. Exemplo de processo elementar e suas entradas e saídas.



A norma (ABNT, 2009b) aponta algumas medidas em ordem a garantir a integridade da coleta de dados e impedir casos como a dupla contagem de valores. São elas: a utilização de fluxogramas para compreensão e organização dos processos elementares e de suas entradas e saídas, de acordo com as fronteiras definidas no escopo do projeto; descrição detalhada de cada processo; especificação das unidades dos valores coletados; descrição da coleta e das técnicas de cálculo necessárias para o tratamento dos dados; documentação clara dos casos especiais, irregularidades ou outros itens associados aos dados fornecidos.

2.2.6. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

A etapa de avaliação de impacto de ciclo de vida deve incluir: a seleção da categoria de impacto, os indicadores desta categoria e os

modelos de caracterização utilizados; correlação dos resultados do ICV de modo a classificá-los de acordo com as categorias de impacto ambiental; e o cálculo dos resultados segundo a caracterização aplicada (ABNT, 2009b).

De uma maneira geral, o principal objetivo desta fase é descrever as consequências em âmbito ambiental dos fluxos e das descargas para o meio ambiente dos valores levantados no ICV, “traduzindo-os” para categorias de impacto ambiental (BAUMANN; TILLMAN, 2004) para facilitar o entendimento do ciclo de vida de um sistema de produto, tornando os resultados ambientalmente mais relevantes e melhorar a leitura e a comunicabilidade dos resultados.

De forma a complementar o entendimento da AICV, seguiremos a linha de raciocínio da categoria de impacto de Aquecimento Global, também exemplificada pela norma de ACV (Tabela 2). Maiores detalhes com relação ao tema específico do Aquecimento global serão apresentados no APÊNDICE 1. que aborda as outras três categorias de impacto utilizadas para esta ACV de maneira mais detalhada.

Tabela 2. Linha de raciocínio para a AICV segundo a categoria de impacto ambiental de aquecimento global.

Termo	Exemplo
Categoria de Impacto	Aquecimento Global
Resultado do ICV	Quantidade de gás do efeito estufa por unidade funcional (por exemplo: metano, óxido nitroso, dióxido de carbono)
Modelo de Caracterização	Modelo de linha de base para 100 anos do Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC).
Indicador de Categoria	Forçamento Radioativo Infravermelho (W/m ²)
Fator de Caracterização	Potencial de Aquecimento Global (PAG) ou Global Warming Potencial (GWP) para cada gás do efeito estufa em kg de CO ₂ equivalente por kg de gás emitido.
Resultado do Indicador de Categoria	Kg de CO ₂ equivalente por unidade funcional
Relevância Ambiental	O forçamento radioativo infravermelho representa os efeitos potenciais sobre o clima, dependendo da adsorção cumulativa de calor pela atmosfera causada por emissões e da distribuição da adsorção de calor ao longo do tempo

Fonte NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

As entradas e saídas do sistema de produto, levantadas no ICV são classificadas e enquadradas segundo as categorias de impacto escolhidas para a ACV. Na Tabela 2 foi exemplificada a categoria de aquecimento global, no entanto, existem diversas outras categorias que podem ser analisadas, como a Depleção da Camada de Ozônio, Ecotoxicidade, Depleção de Recursos Abióticos, Eutrofização, entre outras. A partir do momento que um dado é classificado para uma

categoria de impacto ambiental significa que o processo representa algum consumo ou emissão que cause impacto para a categoria. Por exemplo, um processo de queima que gere como emissão o dióxido de carbono (CO₂) seria classificado para a categoria aquecimento global.

Na sequência, de acordo com o modelo de caracterização do modelo de AICV, este valor seria transformado no indicador da categoria. A Tabela 2 descreve o modelo de caracterização, GWP100 do IPCC, neste caso cada emissão característica para a categoria de impacto seria transformada em CO₂ equivalente (indicador da categoria) de acordo com os fatores de caracterização para cada emissão que foi estimada, segundo o próprio nome do modelo de caracterização, por meio do potencial de aquecimento global de cada emissão. O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é uma medida das emissões de gases do efeito estufa (GEE), como o CO₂ e o metano (CH₄) e é expressa em kg de CO₂ equivalentes (PE AMERICAS, 2010). Somam-se todos os valores caracterizados para se ter o impacto desta categoria referente ao sistema estudado.

Este roteiro de avaliação pode ser realizado com o auxílio de *softwares* especializados em ACV. Escolheu-se para esta dissertação o *SimaPro*[®], que foi elaborado pela empresa holandesa *PRé product ecology consultants*, lançado no ano de 1990 (PRE CONSULTANTS, 2011), e disponível mundialmente conforme aquisição de licença de uso.

Alguns elementos são descritos como opcionais, objetivando complementar a ACV nesta etapa. Entre eles, e o de maior importância para esta dissertação, visto os objetivos propostos em 1.2.OBJETIVOS, é a Análise de Sensibilidade.

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) define esta análise como um procedimento para determinar como mudanças nos dados e nas escolhas metodológicas afetam os resultados da ACV. Este conceito é semelhante aquele descrito por Cacuci (2003, p. 3), “o objetivo da análise de sensibilidade é quantificar os efeitos das variações de parâmetros sobre os resultados calculados”. Ferreira (2004) explica que este tipo de análise é empregada como maneira de medir as alterações nos resultados, reflexos de alterações mais específicas no ICV ou nos dados dos processos unitários (por exemplo, fatores de ponderação, caracterização ou normalização). A análise de sensibilidade está associada à análise de incerteza dos dados (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 2001). Assim como Ferreira (2004), os mesmos autores apontam que a sensibilidade de uma ACV é investigada pela alteração de dados ou questões assumidas inicialmente (enquanto que as demais

permanecem intocadas) e interpretando os resultados e as influências desta alteração.

Uma das propostas deste estudo é identificar influências da fronteira do Sistema sobre os resultados finais da ACV com relação aos cenários de fim de vida do compressor de ar, e portanto, uma análise de sensibilidade alterando a definição metodológica das fronteiras do sistema. A norma aponta inclusive a própria análise de sensibilidade como maneira de se refinar as fronteiras de um sistema (ABNT, 2009b).

2.2.7. Interpretação

A última etapa de uma ACV é a fase de interpretação dos dados gerados. Na interpretação devem figurar três quesitos: o primeiro é a identificação de questões significativas com base nos resultados obtidos no ICV e na AICV; o segundo, uma avaliação do estudo considerando os elementos opcionais da AICV como análise de sensibilidade e consistência; finalizando com as conclusões limitações e recomendações para o sistema analisado (ABNT, 2009b).

Esta etapa da ACV resulta em aplicações diretas como o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, etc.

Especificamente, para esta dissertação esta etapa apontará o melhor cenário de disposição final para o compressor de ar, e abordará as influências do posicionamento das fronteiras do sistema de produto nos resultados, como explicado no item 2.2.6, por meio da análise de sensibilidade. Alguns complementos da interpretação estarão redigido nas discussões desta dissertação sob a forma de análise crítica e recomendações e sugestões para estudos futuros.

2.3. GESTÃO DE RESÍDUOS

2.3.1. Resíduos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010a), com base na norma NBR 10004 (ABNT, 2004, p. 1) define resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas

particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A norma NBR 14004 (ABNT, 2004), classifica-os conforme a sua periculosidade entre: Classe I – perigosos, e Classe II - não perigosos, sendo que os resíduos da Classe II dividem-se ainda em Classe II A - não inertes e Classe II B - inertes.

Os resíduos que são enquadrados na Classe I são aqueles que apresentam periculosidade, característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar: (1) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; e (2) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada (ABNT, 2004). Estas características, segundo a norma são: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Os resíduos de Classe II são todos os que não se enquadram na classificação da Classe I. Os não inertes (Classe II A) são aqueles que podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos classificados como Classe II B (inertes), são aqueles, que basicamente não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água (ABNT, 2004).

Quanto à origem dos resíduos, o Instituto Brasileiro de Administração Municipal em seu Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001) aponta que podem ser agrupados em cinco classes: (1) lixo doméstico ou residencial; (2) lixo comercial; (3) lixo público; (4) Lixo domiciliar especial (entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, pneus); e (5) lixo de fontes especiais (industrial, radioativo, de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, lixo agrícola e resíduos do serviço de saúde).

2.3.2. Compressor de Ar Obsoleto

O compressor de ar analisado possui uma constituição baseada em materiais como o aço baixo carbono, aço bicromatizado, ferro fundido, alumínio, cobre e polímeros, sendo os três primeiros detentores de maior participação em massa do total (ORSI, 2011).

Seguindo as especificações da norma (ABNT, 2004) pode-se classificar o compressor de ar obsoleto, como Classe 1, por ser lubrificado com óleo lubrificante, em decorrência da inflamabilidade, reatividade e possível toxicidade (os elementos que apresentam contato com este óleo seriam os pistões e bielas e o reservatório). Bem como, por possuir em sua constituição metais com certa toxicidade, como o cobre, “os resíduos tecnológicos, por suas características, são considerados resíduos Classe I – perigosos, pois algumas partes contêm metais pesados e necessitam de cuidados específicos e do gerenciamento apropriado da armazenagem à disposição final.” (BEZERRA, 2009, p. 47).

Além disso, depois de sua fase de utilização, um compressor de ar de pequeno a médio porte pode ser classificado como um resíduo de equipamento elétrico e eletrônico (REEE) assim como outros eletrodomésticos pela categoria de “ferramenta elétrica e eletrônica”, portanto deve ter uma correta destinação final ou destino. A diretiva da União Europeia 2002/96/EC (UNIÃO EUROPÉIA, 2003) essencialmente aplica-se a todos os equipamentos que podem ser conectados a um circuito elétrico ou que opera em baterias. Ele inclui de pequenos a grandes aparelhos domésticos (KUMAR; PUTNAM, 2008). Bezerra (2009) acrescenta outras duas nomenclaturas para este tipo de resíduo: Resíduos Tecnológicos ou e-resíduos.

Portanto, devido ao elemento motor elétrico, o compressor de ar pode ser classificado como um resíduo eletroeletrônico (REEE), assim como o são geladeiras e refrigeradores de ar.

Lima, Silva e Lima (2008) caracterizam os REEE como volumoso, e que em alguns casos possuem componentes perigosos, tais como os metais pesados e compostos bromados. Demonstrando, segundo os autores, a necessidade de se aplicar uma gestão eficaz norteada por políticas públicas para direcionar produtores e consumidores a um gerenciamento adequado de uso e descarte.

2.3.3. Pós-Uso de um Compressor

Este item da revisão bibliográfica pretende abordar os tratamentos e disposições finais possíveis de serem aplicadas ao compressor de ar descartado (de acordo com a composição do mesmo e as disposições da PNRS de 2010).

O gerenciamento de resíduos sólidos de um modo mais amplo, compreende o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final

ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010a). Antigamente, como explica Ciambrone (1997), a destinação natural para um produto era o aterramento, caso fosse sólido, ou estação de tratamento de efluentes (ETE) para líquidos. Mais recentemente, a destinação final ambientalmente adequada foi definida envolvendo mais elementos processuais. Segundo o PNRS (BRASIL, 2010a), envolve a destinação de resíduos incluindo a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA do SNVS e do SUASA, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Leite (2006) aponta dois grandes canais adotados para a revalorização de produtos: o “desmanche” e a “reciclagem”. O autor conclui que na impossibilidade dessas revalorizações, os bens de pós-consumo encontram então a disposição final em aterros sanitários ou a incineração controlada.

Existem diferentes definições para a remanufatura, mas a maioria são variações da mesma idéia básica de reconstrução produto (SUNDIN, 2004). De acordo com Kumar e Putnam (2008, p. 312) é um processo de "restauração de um produto a como nova condição, reutilizando, recondicionamento e substituição de peças". Hoje em dia há cada vez mais empresas que estão implementando estratégias de remanufatura, a fim de manter o valor acumulado de produtos ou componentes (KUMAR; PUTNAM, 2008). Além dos benefícios econômicos, Guide Jr. *et al.* (2000) concluem que a fabricação recuperável é uma forma concreta de alcançar muitos dos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Emblemsvag (2003) aponta que as partes passíveis de serem reaproveitadas passam por processo de desmontagem, limpeza e remodelagem, entrando na linha de produção conjuntamente com peças novas para resultar em uma nova unidade com performance suficiente para retornar ao mercado. Recuperando o produto outrora sem valor para o usuário, e permitindo que ele supra novamente as necessidades do consumidor (WANG; GUPTA, 2011; LINDAHL *et al.*, 2006).

A remanufatura pode reduzir significativamente a intensidade dos recursos e aumentar a eco-eficiência de sistemas de produto pela reutilização das partes (BISWAS; ROSANO, 2011). Alguns autores complementam apontando que a remanufatura minimiza o impacto

ambiental da indústria, pela reutilização de materiais e, conseqüentemente, pela redução do consumo de matéria-prima, demandando menos energia, e reduzindo a necessidade de produtos encaminhados à aterros industriais (BISWAS; ROSANO, 2011; KERR; RYAN, 2001; GUIDE JR. *et al.*, 2000; AMEZQUITA *et al.*, 1995), o que também é economicamente benéfico.

A reciclagem, é descrita pelo PNRS como o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolvem a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos (BRASIL, 2010a). Lindahl *et al.* (2006) a definem como processo no qual materiais que seriam destinados ao descarte são coletados, processados, e remanufaturados em novos produtos. Enquanto que, Leite (2006) exemplifica este processo, utilizando a reciclagem de metais, na qual geralmente são: extraídos de diferentes tipos de produtos descartados ou de resíduos industriais para se constituírem em matérias-primas secundárias a serem reintegradas no ciclo produtivo.

Curran (1996) ressalta que a reciclagem de produtos ou resíduos pós-consumo é diferente da reciclagem de resíduos industriais ou oriundos de processos de manufatura. No âmbito da reciclagem pós-consumo, Guineé, De Haes e Huppés (1993), destacam dois métodos mais comuns, a reciclagem de ciclo aberto (*open-loop*) e a reciclagem de ciclo fechado (*closed-loop*). Estes são identificados, segundo Curran (1996) pela natureza do processo de reciclagem, e dos materiais envolvidos. Emblemavag (2003) afirma que esta destinação é a estratégia mais comumente utilizada para se fechar o ciclo de materiais. A reciclagem de ciclo fechado é aquela em que o material retorna para o mesmo processo produtivo (CURRAN, 1996). Enquanto que a reciclagem de ciclo aberto resulta em novos produtos ou materiais que são empregados em outros ciclos produtivos ou apenas disponibilizados no mercado.

No entanto, um sistema que "fecha o ciclo" por meio de reciclagem pode ser apenas ligeiramente mais ecológico e economicamente eficiente do que aquele que descarta o produto como resíduo em um aterro, por exemplo (KERR; RYAN, 2001).

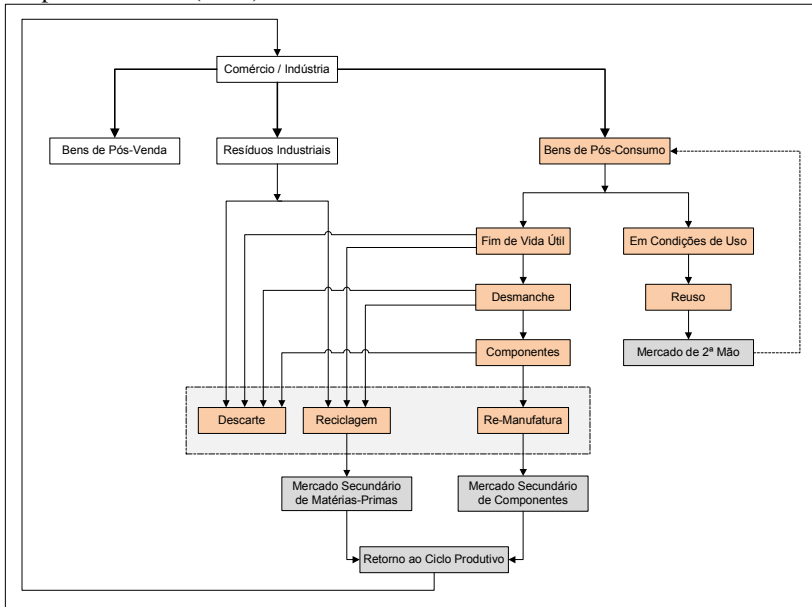
O aterro sanitário é a opção para a disposição final dos rejeitos que são a parcela dos resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada

(BRASIL, 2010a). Para Emblemavag (2003) trata-se do último recurso para a disposição final de produtos porque como concluíram Wang e Gupta (2011), o aterramento e a incineração são escolhas pobres para o meio ambiente, mas que, no entanto, é a opção para resíduos e produtos que não apresentam viabilidade de reciclagem seja técnica ou economicamente.

Leite (2006), explica que tradicionalmente são consideradas “disposições finais seguras”, sob o ponto de vista ambiental, os aterros sanitários tecnicamente controlados, em que os rejeitos são “estocados” entre camadas de terra para que ocorra a absorção natural ou são incinerados. Por definição o aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais (IPT, 1995). Segundo esta mesma fonte, o aterramento busca confinar os rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão da jornada de trabalho ou a intervalos menores, se necessário.

Independente do pós-uso ou cenário final, o produto obsoleto necessita ter seu retorno aplicado. Leite (2006) demonstra pelo fluxograma (Figura 6), o foco de atuação da logística reversa, envolvendo os processos de descarte, reciclagem e remanufatura.

Figura 6. Foco de atuação da logística reversa, com ênfase no pós-consumo. Adaptado de Leite (2006).



2.3.4. Logística Reversa

A logística reversa é o estudo dos canais de distribuição reversos que concentram-se principalmente no exame dos fluxos reversos (sentido inverso ao da cadeia direta) a partir dos produtos descartados pós-consumo ou dos produtos de pós venda (LEITE, 2006). A PNRS (BRASIL, 2010a) a define como instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Leite (2006) explica que esta prática visa agregar valor de diversas naturezas ao produto pós-consumo, por meio da reintegração deles, de seus componentes ou dos materiais constituintes ao ciclo produtivo e de negócios.

Estes fluxos de materiais voltam à empresa por algum motivo, por devoluções de clientes, retorno de embalagens, retorno de produtos

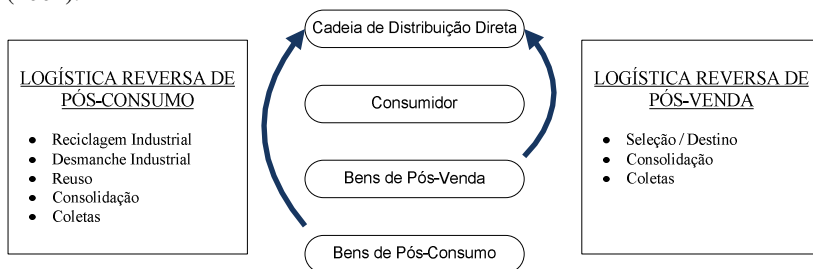
e/ou materiais para atender à legislação (DAHER; SILVA; FONSECA, 2006).

Como é uma área que normalmente não envolve lucro (ao contrário, apenas custos), muitas empresas não lhe dão a mesma atenção que ao fluxo de saída normal de produtos (DAHER; SILVA; FONSECA, 2006). No entanto Lacerda (2009) aponta para a clara tendência das legislações ambientais caminharem no sentido de tornar as empresas cada vez mais responsáveis por todo o ciclo de vida de seus produtos. O autor ainda afirma a ligação estreita entre a logística reversa e o ciclo de vida dos produtos.

Para o *International Working Group on Reverse Logistics* (REVLOG, 2002) os principais fatores para o desenvolvimento da logística reversa de produtos são: (1) Legislação Ambiental, que responsabilizam as indústrias pelo seus produtos descartados e do tratamento necessário; (2) Benefícios econômicos do retorno de matérias-primas ao ciclo de vida ao invés de destinação à aterros; (3) A crescente conscientização ambiental dos consumidores.

Leite (2002) esquematiza a cadeia de distribuição reversa e suas etapas conforme Figura 7, dividindo-a em dois tipos: logística de pós-consumo e logística de pós-venda.

Figura 7. Áreas de atuação e etapas da logística reversa. Adaptado de Leite (2002).



A Logística Reserva de pós-consumo segundo Leite (2002) se refere aos bens descartados pela sociedade em geral que retornam ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo por meio de canais de distribuição reversos específicos. Constituem-se bens de pós-consumo os produtos em fim de vida útil ou usados com possibilidade de utilização e os resíduos industriais em geral. Poderão fluir por canais reversos de Reúso, Desmanche, Reciclagem até a destinação final. Segundo o mesmo autor, o outro processo de logística, o de pós-venda, ocupa a área de planejamento, operação e controle de fluxo físico e de

informações correspondente aos bens sem uso ou pouco uso, e que, por diferentes motivos (por exemplo, danificado no transporte) retornam aos diversos elos da cadeia de distribuição direta.

Leite (2006) explica que a grande diferença entre os bens de pós consumo e os de pós venda é o fato de apresentarem uso ou não, sendo os de pós uso, utilizados até o final de sua vida, e, eventualmente, não apresentando mais utilidade ao proprietário. A Logística de Pós-Consumo é aquela aplicada ao compressor empregado neste estudo de ACV, pois o mesmo é descartado após o período de uso.

2.4. ACV DO PÓS-USO DE COMPRESSORES

Este item apresenta o estado da arte dentro da temática proposta por esta dissertação, ou seja, trabalhos e artigos que abordam ACVs de cenários de pós-uso de compressores e produtos semelhantes, ACV do Sistema de Produto propriamente dito, que envolvam a logística reversa ou transportes, o tratamento de resíduos (frações metálicas principalmente) bem como, pelo objetivo metodológico desta dissertação, ACVs com variação da localização da fronteira do estudo.

Neste sentido, Zanghelini (2010) realizou uma ACV de uma fração importante do sistema de produto analisado neste trabalho, o reservatório de ar. Responsável pelo maior consumo de matérias-primas em um subconjunto, bem como processos de manufatura, esse componente corresponde também por grande parcela material possível de reciclagem e remanufatura.

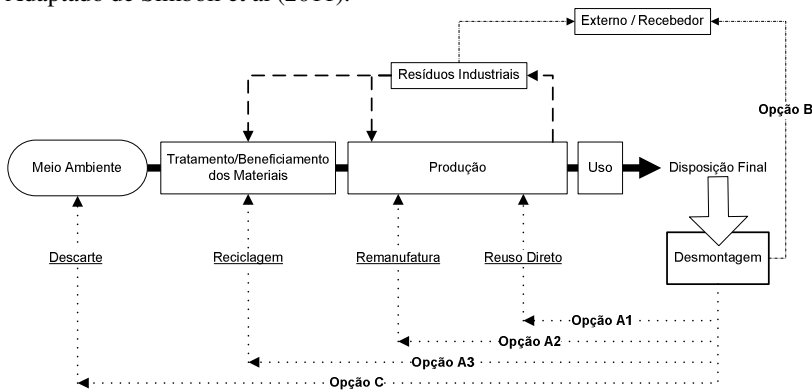
Orsi (2011) desenvolveu uma ACV de gestões finais para um compressor de ar alternativo lubrificado. Apesar de indicar uma vida útil de 10 anos, a autora realiza a análise pontual das gestões com a fronteira estabelecida apenas na etapa final do ciclo de vida do Sistema de Produto e aponta o cenário preferível para a disposição final como o de Reciclagem. No entanto, o cenário de Remanufatura acrescenta vida útil ao equipamento, prolongando em 5 anos a fase de uso do mesmo. Caso a fronteira seja definida de forma a englobar as demais etapas do ciclo de vida deste equipamento (principalmente uso) é possível que o cenário de melhor desempenho ambiental passe a ser outro. Seriam necessários somente dois compressores, para desempenhar sua função em 30 anos no caso da Remanufatura (10 anos mais 5 anos após remanufatura), enquanto que para os cenários de reciclagem e disposição em aterro, três. Apesar de Orsi (2011) ter utilizado a concepção de produto evitado, caberia uma análise um pouco mais aprofundada das influências da fronteira sobre os resultados finais de modo a confirmar ou retificar o

melhor cenário para a disposição final do equipamento obsoleto e de suas frações materiais.

Biswas e Rosano (2011) realizaram uma análise detalhada da disposição final de um compressor de ar (componente de um condicionador de ar) confrontando os resultados em emissões de gases do efeito estufa para o equipamento novo e para o equipamento remanufaturado. Os processos envolvidos foram a desmontagem, limpeza, acabamento, montagem e teste (semelhante aos processos de remanufatura propostos por Orsi, 2011). Mais uma vez a etapa de uso do equipamento foi desconsiderada. Biswas e Rosano (2011) estabeleceram a fronteira “*cradle to the gate*” (berço, que seria a aquisição da matéria-prima, ao portão da indústria, referente à fabricação) para o equipamento manufaturado e “*grave to the cradle*” (túmulo/disposição final ao berço/aquisição da matéria-prima) para o equipamento remanufaturado. Neste estudo o equipamento remanufaturado apresenta um desempenho ambiental muito superior ao equipamento novo, limitado à análise da manufatura de ambos. No entanto, questões como a vida útil acrescentada, ou não, pela remanufatura são importantes, podendo vir a inviabilizar ambientalmente o cenário (caso o ganho de uso não justifique os processos envolvidos na remanufatura). Mais uma vez as fronteiras do sistema podem vir a induzir a escolha errada para a disposição final do equipamento.

Simboli *et al.* (2011), definiram cenários para a disposição final de uma motocicleta com base em frações de materiais dos componentes objetivando o fechamento do “*loop*” aquisição de matéria-prima – uso – gestão final de resíduos (envolvendo reciclagem e remanufatura). Pré-incluindo a fase de uso em uma posterior análise (Figura 8). Embora o sistema de produto analisado não desempenhe a mesma função do objeto em análise nesta dissertação, as frações materiais são bastante semelhantes, dominadas por metais como aço, alumínio, ferro, cobre e polímeros.

Figura 8. Opções para o fechamento do “loop”, incluindo a fase de uso. Adaptado de Simboli et al (2011).



Enquanto que Neri *et al.* (2000a) realizaram uma ACV do berço ao túmulo de um compressor de ar axial, assumindo um cenário de pós-uso e verificando os impactos ambientais gerados. Neste estudo, considerou-se o seguinte cenário para a disposição final do equipamento: os componentes metálicos seriam separados dos componentes plásticos, e então reciclados enquanto que os plásticos seriam incinerados. Considerou-se o material reciclado como produto evitado, de forma a acrescentar impacto positivo aos resultados. Posteriormente, estes mesmos autores (NERI *et al.*, 2000b) realizaram um estudo comparativo entre dois compressores axiais diferentes produzidos por uma empresa italiana, na qual estabeleceram a fronteira do estudo do berço ao túmulo, assumindo o mesmo cenário de disposição final anteriormente criado. Algumas recomendações deste estudo apontam para o reúso de determinados componentes.

Outros estudos auxiliaram nas definições de cenários em conjunto com a Empresa Schulz S/A e discussões dos resultados encontrados. Os pesquisadores Lambert e Stoop (2001) que realizaram um estudo dos processos de descarte de refrigeradores domésticos envolvendo reciclagem, reúso e destinação de resíduos, Elijošiūtė e Varžinskas (2010), que estudaram a remanufatura de motores a combustão, Ribeiro, Ferreira e Partidário (2007) que realizaram uma ACV de um componente de carro composto por vários materiais, e portanto, tendo que passar por processos de separação e tratamento/disposição final, Klos (2000) que aplicou um balanço ecológico exemplificado por um compressor de ar, Lindahl, Sundin e Östlin (2006) que realizaram uma comparação ambiental entre os cenários de pós-uso de eletrodomésticos

da empresa Electrolux e Kerr e Ryan (2001) que avaliaram uma copiadora da Fuji Xerox e mostraram ganhos ambientais da remanufatura. Outros estudos como Smith e Keoleian (2004), Huisman, Stevels e Stobbe (2004), Dowdell *et-al.* (2000), também auxiliaram na discussão dos resultados desta dissertação.

Quanto à discussão relacionada à análise de sensibilidade, variando as fronteiras do sistema de produto de acordo com as etapas do ciclo de vida, Tillman *et al.* (1994) realizaram um estudo referente a escolha das fronteiras do sistema em ACVs. Enquanto Löfgren, Tillman e Rinde (2011) aplicaram uma variação de fronteiras exemplificando um setor contemplado por oito componentes diferentes que unem uma roda à um automóvel. Já Denison (1996) compilou diversos estudos na qual o tema foi a comparação entre impactos ambientais relacionados à reciclagem, incineração e aterramento com ênfase nas fronteiras dos sistemas e em suas influências para os resultados e discussões.

3. METODOLOGIA

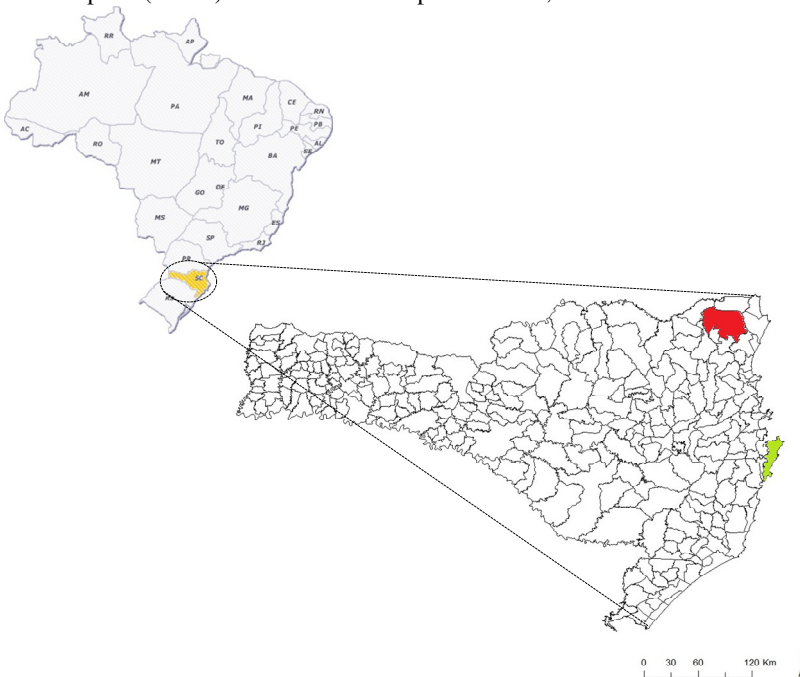
A metodologia proposta para esta dissertação foi baseada na forma de subitens que acompanham aproximadamente a estruturação descrita pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044: (ABNT, 2009b) para estudos de ACV.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO

Este trabalho foi realizado com o apoio da Empresa Schulz S/A, localizada no município de Joinville, e do Grupo de Pesquisa em Avaliação de Ciclo de Vida (CICLOG) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, situada em Florianópolis. A Figura 9 indica a localização dos municípios dentro do estado de Santa Catarina, em vermelho, Joinville, sede da Empresa Schulz S/A e em verde Florianópolis, local das instalações do CICLOG.

A coleta de dados foi realizada na divisão de compressores da Empresa Schulz S/A, mais especificamente na linha de produção do compressor de ar CSL 20BR e contou com o apoio dos setores de: Engenharia de Produtos, Controle de Processos e Operação, Linha de Manufatura, Manutenção, Testes de Bancada, Qualidade e Meio Ambiente, Vendas, Compras (Requisição de Matérias-Primas), Logística e Central de Descartes de Resíduos.

Figura 9. Localização dos municípios de Joinville (Schulz S/A) em verde e de Florianópolis (UFSC) em vermelho. Adaptado: IBGE, 2012.



3.2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE PRODUTO

O sistema de produto foi definido com base em projetos realizados pelo CICLOG em conjunto com a empresa fabricante (ORSI, 2011; ZANGHELINI, 2010). Considerou-se um compressor de ar e todos os seus processos elementares de aquisição de matérias-primas, fabricação, uso, manutenção e disposição final. Mais especificamente, o equipamento escolhido foi o Compressor de funcionamento a pistão alternativo lubrificado, denominado pelo sistema interno da empresa Schulz S/A, de CSL 20BR/200. Optou-se por este produto porque ele representa uma grande fatia das unidades vendidas neste setor, alcançando uma média anual de 4.200 compressores vendidos⁵, e por conseguinte, ao pensarmos na substituição destas unidades torna-se um produto de considerável quantidade descartada todos os anos.

⁵ Estimado de acordo com informações do Setor de Controle de Produção da Empresa Schulz S/A.

O compressor, Sistema de Produto escolhido para a ACV, pode ser visualizado na Figura 10, enquanto que suas principais especificações técnicas estão listadas na Tabela 3.

Figura 10. Compressor Alternativo Lubrificado CSL 20BR. Fonte: Schulz S/A (2012).



Tabela 3. Ficha técnica do compressor de ar CSL20BR.

	Descrição	Valor
Geral	Modelo	CSL 20BR/200L
	Deslocamento Teórico (l/min.)	566,00
	RPM	970,00
	Pressão Mínima de Operação (Bar)	7,50
	Pressão Máxima de Operação (Bar)	12,00
	Volume de Óleo (ml)	1000,00
	Peso Bruto (kg)	177,00
	Peso Líquido (kg)	149,00
	Dimensões (Larg./Alt/Comp) (m)	0,5/1,020/1,305
Compressor	Número de Estágios	2,00
	Número de Pistões (em linha)	2,00
Motor	Potência (HP)	5,00
	Potência (kW)	3,70
	Número de Polos	2,00
	Tensão (V)	220/380, 380/660
Reservatório	Volume (l)	183,00

Fonte: Schulz S/A (2012).

3.3. DEFINIÇÃO DA UNIDADE FUNCIONAL E ALOCAÇÃO

A definição da Unidade Funcional (U.F.) está associada a escolha de uma função (dentre vários existentes) de um Produto ou Serviço. A função escolhida para este sistema de produto é fornecer um volume de ar comprimido a uma pressão superior à atmosférica.

A unidade funcional será a produção de 3.500.400,00 m³ de ar comprimido a 7,5 BAR de pressão. Este volume se refere a produção de 3 usos de 10 anos cada de um compressor, que segundo o setor de teste de bancada é de 1.100.800,00 m³ de ar comprimido a cada etapa de uso (item 4.1.3. Uso e Manutenção). Esta extrapolação temporal, para 3 fases de uso, é abordado com maior detalhamento no item 3.5. FRONTEIRAS DO SISTEMA, e ocorre em virtude da necessidade de equalizar os cenários propostos para 30 anos, como um mínimo múltiplo comum de tempo de análise, uma vez que na Remanufatura, 1 ciclo de vida do produto perdura por 15 anos.

Métodos tradicionais de alocação, como o econômico ou por foram evitados conforme recomendação da norma ISO 14044 (ABNT, 2009b), por meio da expansão do sistema, considerando os co-produtos como produtos evitados e então subtraindo-os do valor final do impacto ambiental. Esta expansão é realizada de forma a manter a comparabilidade entre os sistemas de produto, como aponta Weidema (2001), alterando o equilíbrio de saída do co-produto que ocorre em apenas um dos sistemas pela sua subtração equivalente no sistema de produto, ou seja, contabilizando-os como produtos evitados. É o que ocorre com co-produtos dos cenários que envolvem a reciclagem, com a recolocação de frações recicladas no mercado. Este procedimento de alocação é preferível aos tradicionais, segundo Weidema (2001).

3.4. CENÁRIOS DE PÓS-USO

Os cenários para o pós-uso do produto pós-consumo foram elaborados conforme contato direto com a empresa fabricante do equipamento por meio do setor de Engenharia e Desenvolvimento de Produtos assegurando a possibilidade técnica de serem desenvolvidos. Envolveram as possibilidades de reciclagem, remanufatura, e aterramento (aterro sanitário) conforme as composições dos componentes e a capacidade de serem desmontadas, baseando-se em Orsi (2011).

O primeiro cenário é aquele em que o compressor é disposto diretamente e inteiramente em aterro sanitário. É muito provável que

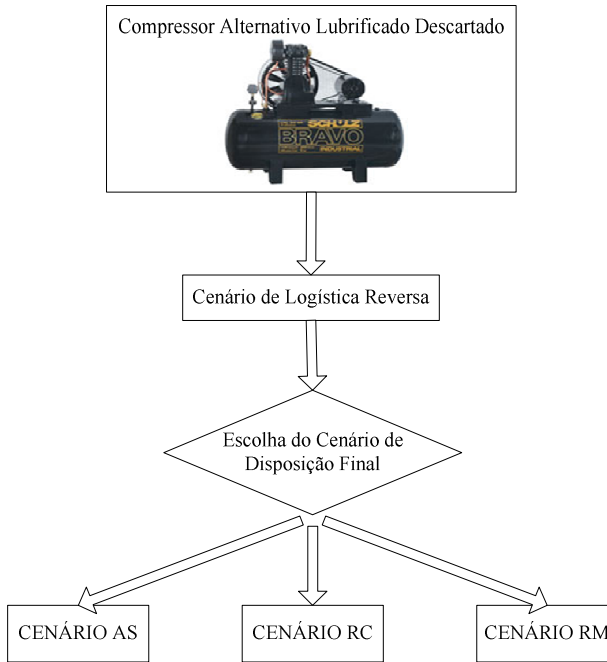
esta situação não ocorra, tendo em vista que o equipamento contém certo valor mesmo com o término de sua vida útil, (materiais metálicos envolvidos em sua manufatura, como o aço, ferro fundido, alumínio e cobre). No entanto, não é uma destinação impossível e justifica-se como uma referência para a comparação com os demais cenários. Denominado de “Cenário AS”.

O segundo, chamado de “Cenário RC”, é o cenário em que o compressor passa por um processo de desmontagem e todos os componentes com potencial de reciclagem são reciclados (considerado a refundição como reciclagem), complementado pelo envio dos componentes não recicláveis para o aterro sanitário.

Por fim, o terceiro e último cenário, envolve a remanufatura do compressor, existindo processos intermediários de preparação do compressor obsoleto e a troca de componentes não aproveitáveis por novas peças. As peças trocadas são, dependendo do caso, recicladas ou dispostas em aterro sanitário. Este cenário ficou denominado como “Cenário RM”, e apresenta algumas particularidades do ponto de vista da ACV, em comparação aos anteriores, como o consumo maior de matérias-primas pelos processos intermediários de remanufatura, ganho de vida útil de 5 anos após a fase de uso, a contabilização menor de manufatura e matérias-primas no horizonte de 30 anos (2 compressores compreendem o espaço, pois a vida útil se estende a 15 anos para cada um), etc. Após a etapa de ‘segundo uso’, o compressor assume o cenário RC para disposição das suas partes, ou seja, reciclagem das frações recicláveis e aterramento das demais frações.

Estes cenários que serão detalhados nos próximos itens, também foram alvo de um estudo preliminar desenvolvido por Orsi (2011), o qual envolve a análise pontual destas gestões por meio da metodologia de ACV, e podem ser visualizados em um fluxograma simplificado (Figura 11).

Figura 11. Fluxograma simplificado da rota de gestão final, com a variação para cada cenário definido.



3.4.1. Cenário De Logística Reversa

Quanto à logística reversa dos compressores obsoletos, o cenário foi criado com base no censo industrial anual realizado pelo IBGE em 2010, por meio do qual levantou-se o número de empresas existentes em cada estado e região brasileira. Foi assumido para este cenário que o equipamento compressor de ar teria um maior emprego/consumo de acordo com as necessidades industriais e que um compressor adquirido substitui um compressor usado. Desta maneira, as regiões com maior número de indústrias seriam aquelas que mais consumiriam o produto e conseqüentemente produziram o compressor obsoleto (pós-uso).

A proposta é assumida com a estruturação de um Centro de Recebimento Principal na própria empresa, localizada no município de Joinville, tendo os Centros de Recebimento Regionais em cada um das 5 regiões do país. Deste modo, permite-se o uso das dependências já existentes, ou de espaço físico de posse da empresa. Esta proposta segue esquematizada na Figura 12. Os compressores seriam todos transportados para o centro principal advindos de todas as regiões

brasileiras (em vermelho as vias de transporte Regionais), conforme localizações e distâncias assumidas na Tabela 4). A localização e as distâncias foram assumidas de acordo com municípios importantes e centralizados dentro de suas respectivas regiões.

Figura 12. Mapa demonstrativo de vias de logística reversa.



Questões relativas à edificação e construção civil não foram incluídas, assumindo que seriam idênticas aos três cenários de pós-uso dos equipamentos e portanto indiferentes aos resultados comparativos. Desconsiderou-se também o transporte inicial do compressor, desde o consumidor final até o centro de recebimento regional.

A Tabela 4 apresenta as distâncias assumidas entre Joinville e os municípios adotados como os centros de recebimento regionais, bem como a concentração industrial por regiões no Brasil, em porcentagem.

Tabela 4. Concentração industrial brasileira, localizações dos centros de recebimento regionais e distâncias assumidas para a ACV.

Região	Indústrias	Município (Centro Regional)	Distância (km)
Sul	28%	Florianópolis, SC	200
Sudeste	52%	São Paulo, SP	550
Centro-Oeste	6%	Campo Grande, MS	1200
Nordeste	11%	Salvador, BA	2500
Norte	3%	Marabá, PA	3000

Fontes: IBGE(2010) e Software Google Maps.

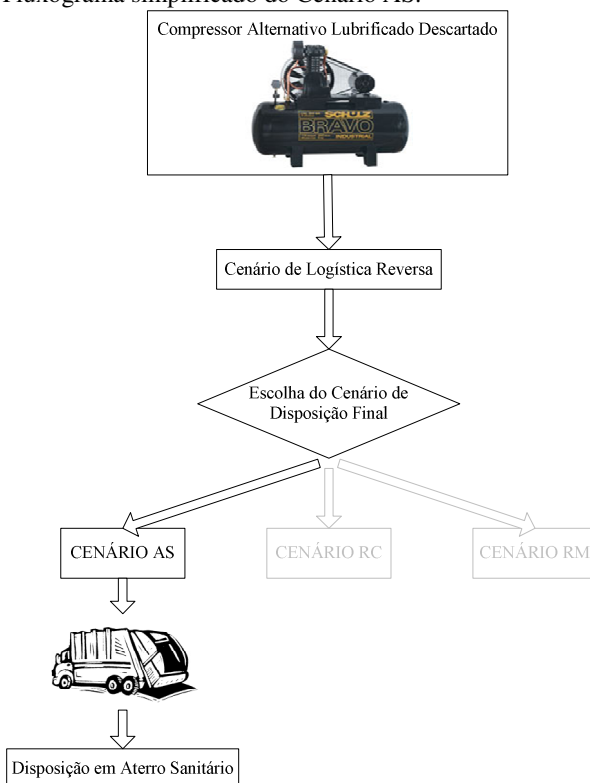
Assim, para um compressor, com base no Censo Industrial (segunda coluna da Tabela 4), tem-se 52% de sua massa oriunda da região sudeste sendo transportado pela distância de 550 km entre São Paulo e Joinville; 28% proveniente do sul, percorrendo 200 km entre a capital catarinense e a cidade sede da Schulz S/A; 11% do nordeste transportada de Salvador por 2500 km; 6% da região centro-oeste, com base em Campo Grande, percorrendo 1200 km até Joinville; e finalizando, 3% do compressor percorrendo 3000 km de Marabá na região Norte até o centro de recebimento principal.

Finalizando o cenário proposto, assumiu-se o transporte mais comum empregado no Brasil, por meio de caminhão carreta, de grande porte (até 30 toneladas de capacidade de carga), cujo combustível utilizado é o óleo diesel.

3.4.2. Cenário Aterro Sanitário (AS)

O Cenário AS é aquele na qual o produto é encaminhado ao aterro sanitário e disposto inteiramente na célula que está sendo preenchida. Neste cenário, basicamente, após a logística reversa, o produto é movimentado e transportado novamente até o aterro mais próximo (Figura 13).

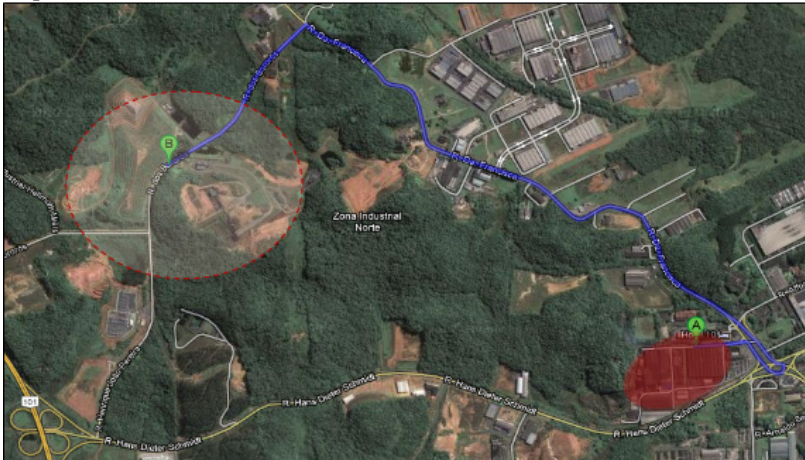
Figura 13. Fluxograma simplificado do Cenário AS.



O compressor é descarregado pelo caminhão responsável pela logística reversa, por meio de empilhadeiras movidas a gás natural. Este compressor é recebido pesando em torno de 149 kg, uma vez que as paredes e o estrado (*pallet* de madeira) que compõe a embalagem são descartados pelo consumidor quando no início da fase de uso do equipamento (aquisição do compressor no distribuidor). Na sequência, é novamente movimentado pela empilhadeira para o embarque do caminhão de transporte ao aterro. A distância assumida para este transporte está de acordo com o posicionamento da empresa e do aterro sanitário mais próximo, conforme Figura 14. Em “A” a empresa Schulz S/A e em “B” o aterro do distrito industrial de Joinville separados por aproximadamente 5 km. As quantidades aterradas, bem como as especificações dos materiais, basearam-se nas frações materiais empregadas no compressor de ar analisado.

Para este transporte, considerou-se caminhão carreta com até 21 toneladas de capacidade de movimentação (um pouco menor que o caminhão utilizado na logística reversa).

Figura 14. Localização da empresa e do aterro sanitário. Adaptado: Google Maps, 2012.



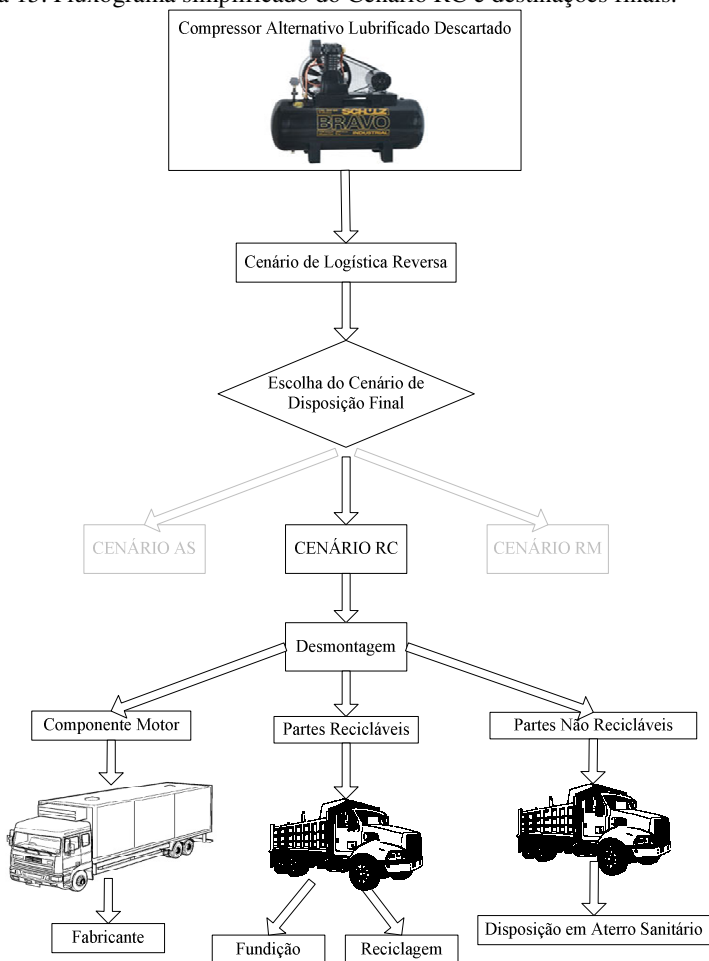
3.4.3. Cenário Reciclagem (RC)

O Cenário RC, ou o de Reciclagem, inicia-se com o recebimento do compressor descartado na instalação de desmontagem, é movimentado por empilhadeiras à gás natural, local na qual os componentes são separados e as frações recicláveis são transportadas até a indústria de reciclagem enquanto que as frações não recicláveis são transportadas e dispostas em aterro sanitário. Esta divisão foi realizada conforme indicação dos setores responsáveis na empresa Schulz S/A pelos processos e engenharia de produtos (ORSI, 2011), de forma a garantir a viabilidade técnica dos componentes possíveis de serem recicláveis. Os processos de reciclagem foram baseados nas tecnologias existentes para tal, conforme o material envolvido e o banco de dados do *Ecoinvent*[®]. As frações de aço e ferro fundido foram concebidas de forma a serem refundidas nos próprios fornos da empresa, de modo que esta matéria retornaria ao ciclo de peças fundidas na empresa. Este encaminhamento foi o mesmo utilizado para compor os cenários de reciclagem de Dowdell *et al.* (2000).

Assumiu-se o componente Motor como sendo encaminhado à empresa responsável, Weg Motores, localizada no município de Jaraguá

do Sul, estado de Santa Catarina. Os canais de transporte e disposição final estão demonstradas em um fluxograma simplificado, na Figura 15.

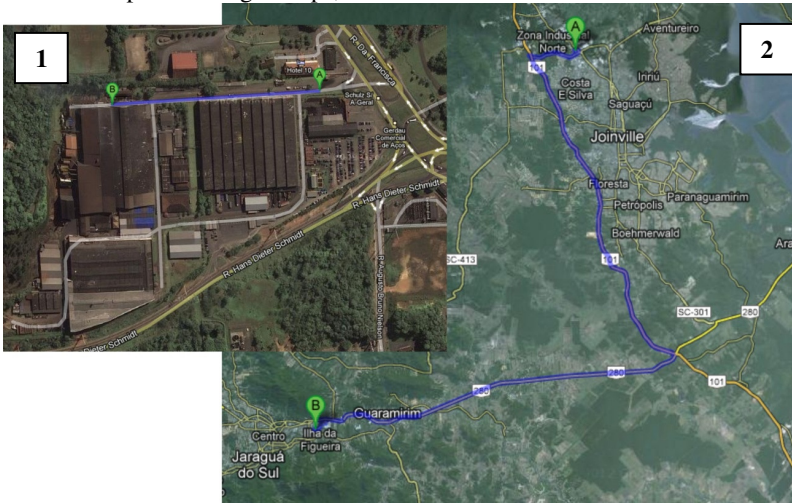
Figura 15. Fluxograma simplificado do Cenário RC e destinações finais.



As distâncias assumidas para as frações destinadas ao aterro, à fundição e à empresa fabricante dos motores estão de acordo com o posicionamento real das mesmas, 5 km (Figura 14), 0,3 km e 46 km respectivamente (Figura 16). Para as frações recicláveis assumiu-se uma distância hipotética de 100 km.

Assim como no Cenário AS, as quantidades recicladas e suas especificações basearam-se nas frações materiais empregadas no compressor de ar analisado. Este mesmo raciocínio é empregado para as frações aterradas.

Figura 16. Localização dos setores de recebimento e de fundição em “1”; e Localização da empresa e fabricante dos motores (município de Jaraguá do Sul) em “2”. Adaptado: Google Maps, 2012.



3.4.4. Cenário Remanufatura (RM)

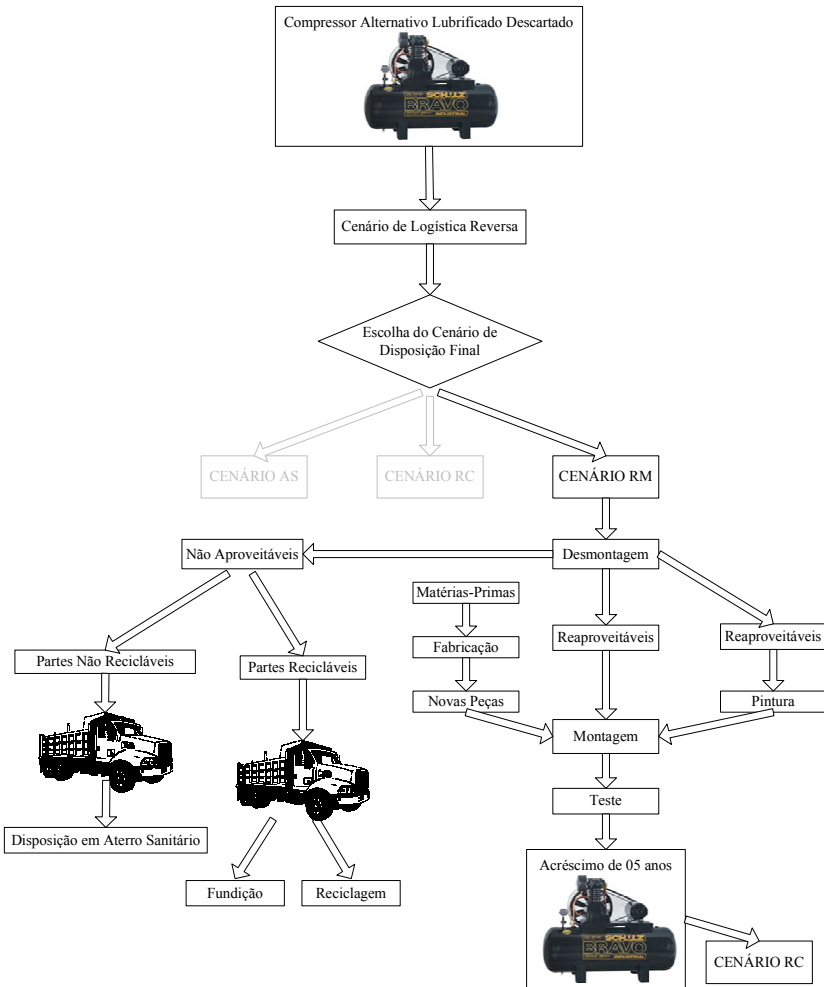
O Cenário RM, de Remanufatura do equipamento, também inicia-se com o recebimento do compressor descartado na instalação de desmontagem, local na qual os componentes também passam por um processo de separação, semelhante ao processo assumido no Cenário RC. A movimentação interna, tanto do compressor obsoleto, como das frações é realizada por empilhadeiras à gás natural. A partir de então, alguns componentes como, por exemplo, as peças de contato externo (reservatório e o volante) passam por processos intermediários de pintura para serem reaproveitados. Outros componentes reaproveitáveis são desmontados e remontados acrescidos de componentes novos, substituindo aqueles que não podem ser reutilizados. Estes, não podem permanecer no compressor por motivos de segurança, devido ao desgaste ou mesmo para garantir o funcionamento adequado do equipamento por mais 5 anos. Parte é destinada ao aterro sanitário (frações não recicláveis) e parte é encaminhado à reciclagem ou

fundição (frações recicláveis). Assim como no Cenário RC, os processos de reciclagem foram baseados nas tecnologias existentes e banco de dados.

O compressor então é montado novamente por processos de remanufatura, com a inserção destas novas peças (incluindo impactos da aquisição da matéria-prima primária e a manufatura das mesmas) acrescidas àquelas reutilizáveis, passando por um teste de segurança final para assegurar o funcionamento do mesmo. Assim, o equipamento remanufaturado prolonga em 5 anos a sua vida útil, alcançando portanto 15 anos de uso. Estas definições também respeitaram a indicação dos setores responsáveis na empresa Schulz S/A pelos processos e engenharia de produtos e teste de bancada.

Após o esgotamento da vida útil deste compressor que já foi remanufaturado, ele segue para a disposição final conforme o Cenário RC, tendo partes recicladas, partes refundidas e partes aterradas (Figura 15). Este cenário de pós-uso está demonstrado no fluxograma simplificado abaixo (Figura 17).

Figura 17. Fluxograma simplificado do Cenário RM e destinações finais.



Um cenário muito semelhante foi proposto por Dowdell *et al.* (2000) que analisaram por meio da metodologia de ACV gestões finais de Equipamentos Eletro Eletrônicos no Reino Unido. para comparação de resultados.

As rotas das destinações seguem as estimativas baseadas nos posicionamentos das partes interessadas, demonstrados na Figura 14 e na Figura 16. Assim como no Cenário AS, e RC as quantidades

remanufaturadas, aterradas e recicladas bem como suas especificações basearam-se nas frações materiais empregadas no compressor de ar analisado.

3.5. FRONTEIRAS DO SISTEMA

A localização da fronteira do Sistema é um dos fatores alvo da análise de sensibilidade desta dissertação, descrita como o quarto objetivo específico no item 1.2.2. No entanto, foi estabelecida primeiramente de modo a garantir a comparação justa entre os cenários, perfazendo assim os outros três objetivos específicos e mais o objetivo principal desta dissertação (1.2.1.Objetivo Geral). Posteriormente, o posicionamento foi variado e interpretado as influências do mesmo nos resultados.

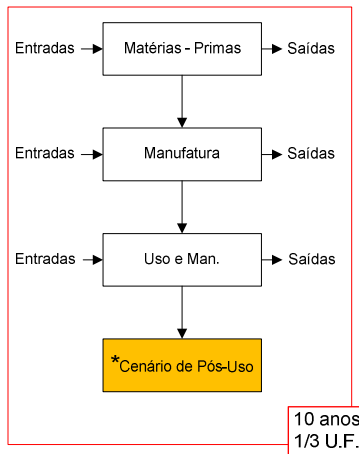
Este posicionamento inicial das fronteiras englobou todas as etapas do ciclo de vida do compressor, *from cradle to the grave* ou do berço ao túmulo e situações assumidas para cada cenário. Assim como no estudo realizado por Soares *et al.* (2012), o berço foi estabelecido na obtenção das matérias-primas e seu beneficiamento primário, enquanto que o túmulo estabeleceu-se no pós-uso do compressor (EOL)⁶.

Em virtude de o Cenário RM acrescentar vida útil ao equipamento, expandiu-se o horizonte temporal dos sistemas (como previamente apontado no item 3.3. DEFINIÇÃO DA UNIDADE FUNCIONAL E ALOCAÇÃO), equalizando-os pela fase de uso do equipamento, resultando no aumento de ciclos de vida compreendidos para cada Cenário.

Desta a forma a Figura 18, que representa o ciclo de vida “base” para os cenários demonstra as fronteiras sem a aplicação da expansão, compreendendo apenas 10 anos de vida do equipamento e o preenchimento de um terço da unidade funcional, ou em outras palavras, o ciclo de vida de um equipamento sem ter (ainda) as influências dos cenários de pós-uso e a expansão temporal.

⁶ *End-of-Life*, fim de vida em inglês.

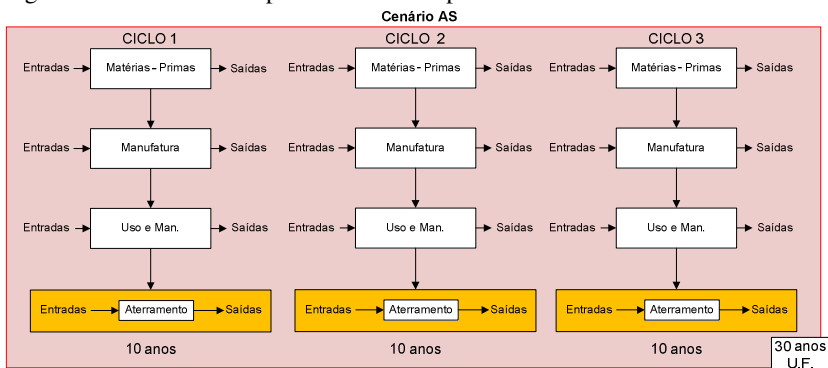
Figura 18. Posicionamento da fronteira do Sistema (em vermelho), para a análise e escolha do cenário de melhor disposição final. * Etapa da variação dos cenários.



A equalização deve ocorrer porque ao aproveitar um compressor obsoleto para, por meio da troca dos componentes e aplicação de processos intermediários, acrescentar vida útil ao equipamento, o ciclo de vida se torna mais longo que os demais (RC e AS) tornando a comparação de um ciclo versus um ciclo injusta.

Deste modo, ao analisar três ciclos de vida para um compressor do Cenário AS e do Cenário RC (Figura 19 e Figura 20), e dois ciclos para um que passe pela remanufatura (Figura 21) a comparação se torna justa, equilibrando todos os três cenários (e suas influências) para alcançar a unidade funcional escolhida por meio de um mínimo múltiplo comum de anos de ciclo de vida. Por exemplo, em relação a “fabricação” do compressor, em 30 anos tendo o Cenário AS como pós-uso, são necessários 3 equipamentos para que a U.F. seja atendida, portanto, 3 fases contabilizadas de cada etapa do ciclo de vida conforme Figura 19.

Figura 19. Ciclos de vida para o cenário de pós-uso AS.



Quando o ciclo de vida é finalizado pelo Cenário RC, são necessários também três contabilidades de cada etapa para a produção volumétrica proposta como U.F., com a diferença que as frações recicladas são consideradas produtos evitados e os processos adquiridos de reciclagem e transportes acrescentam impactos ambientais ao cenário (Figura 20).

Ao aplicar o Cenário RM como pós uso, torna-se necessário fabricar apenas dois compressores novos (2 fases relativas à aquisição de matérias-primas e manufatura), pois com o acréscimo de 5 anos a cada compressor remanufaturado a U.F. é atendida nos mesmos 30 anos. Neste cenário as frações recicladas são consideradas produtos evitados, conforme aponta a

Figura 21, enquanto que são acrescidos maiores impactos em detrimento do maior número de processos intermediários de remanufatura, seus consumos e gerações (inclusive peças repostas).

A comparação entre os ciclos e seus cenários de pós-uso contemplam então as etapas esquematizadas pela Figura 19 para AS, Figura 20 para RC e Figura 21 para RM.

Esta extrapolação temporal de 30 anos permanece aplicada durante as variações do posicionamento das fronteiras, de modo que quando analisadas etapas separadas do ciclo de vida como, por exemplo, a aquisição de matérias-primas originais, os ciclos estejam equalizados.

Figura 20. Ciclos de vida conforme o cenário de pós-uso RC.

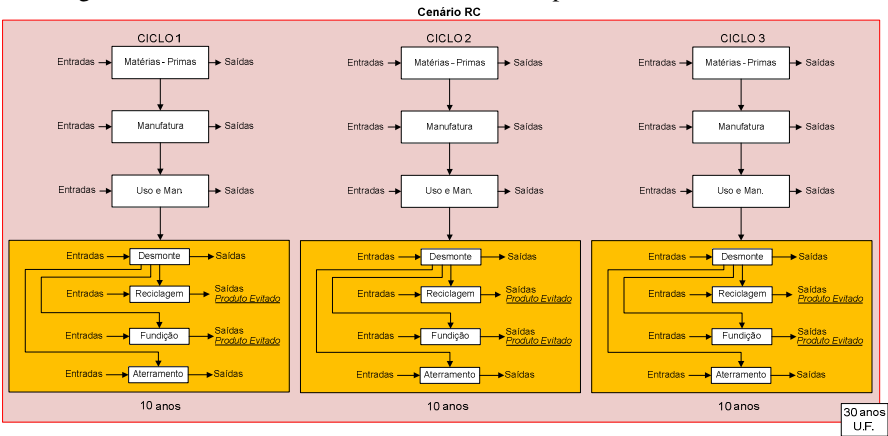
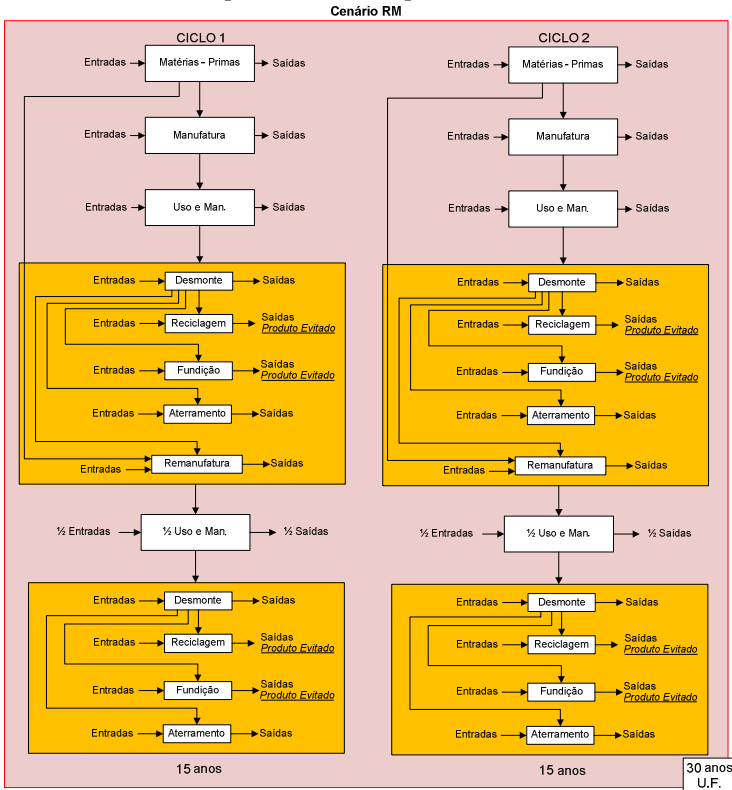


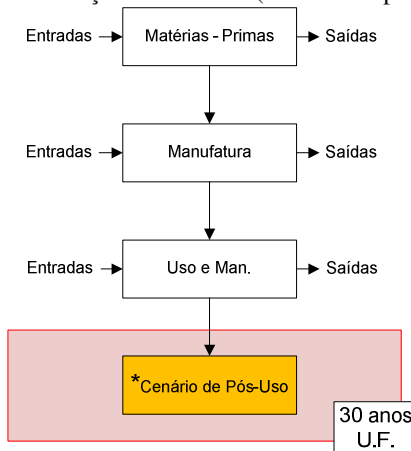
Figura 21. Ciclos de vida para o cenário de pós-uso RM.



A análise de sensibilidade das fronteiras envolvendo os três cenários do sistema contemplou, primeiramente, a fronteira estabelecida na etapa final do ciclo de vida (Figura 22), envolvendo apenas o fim de vida do compressor segundo cada cenário e as entradas e saídas relativas a cada um, sem as influências que o pós-uso causa nas demais etapas do ciclo de vida. Deste modo, os produtos evitados aqui não foram considerados por estar associado à aquisição de matérias-primas (no caso, o potencial de se evitar ter que adquiri-las da forma virgem).

A Figura 22 representa o posicionamento da fronteira conforme ciclo de vida ‘base’ para o compressor. Com relação às características de cada cenário, esta comparação contabilizaria as etapas em laranja nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21, com exceção dos produtos evitados em RC e RM.

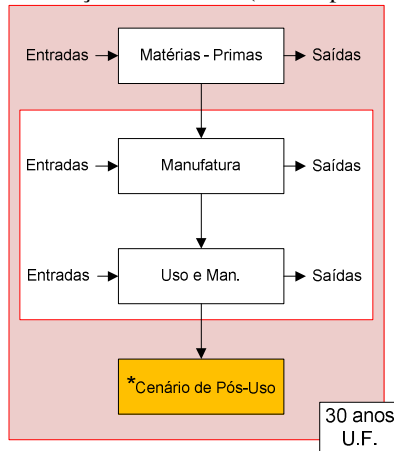
Figura 22. Primeira delimitação da fronteira (sem incluir produto evitado).



O segundo posicionamento envolveu a fase de fim de vida e aquisição de matérias-primas, (conforme Figura 23) buscando a influência do pós-uso, principalmente para os cenários que envolvem reciclagem e remanufatura. A tendência deste posicionamento é valorizar os cenários que acabam por retornar a matéria-prima para o mercado, já que este material foi tratado como um impacto associado à não produção da matéria-prima virgem, na concepção de produto evitado como já mencionado. Entende-se que ao recolocar a matéria-prima no mercado, a busca pela mesma de maneira virgem não se faz mais necessária. Nas Figuras 19, 20 e 21, neste posicionamento, além

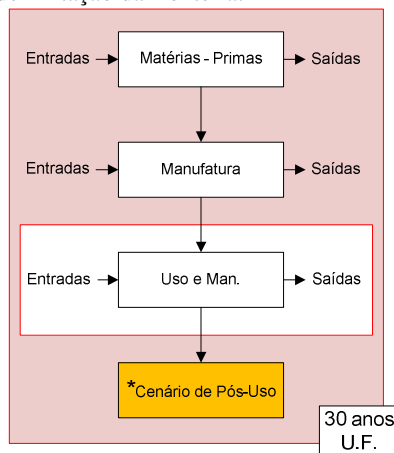
das partes em laranja são contemplados os produtos evitados e incluídas as primeiras etapas do ciclo de vida de cada cenário.

Figura 23. Segunda delimitação da fronteira (contemplando o produto evitado).



A terceira e última delimitação de fronteiras, leva em conta todas as etapas do ciclo de vida do compressor de ar escolhido, com exceção da fase de uso e manutenção que é idêntica aos três cenários, e portanto passível de retirada em um estudo comparativo, conforme a Figura 24.

Figura 24. Terceira delimitação da fronteira.



3.6. COLETA DE DADOS

Esta ACV baseou-se em dados primários complementados por dados secundários. Segundo a sua origem, os dados primários são aqueles coletados diretamente na empresa, já os secundários, são oriundos da base de dados do *Ecoinvent*[®], relativos a realidade de outros projetos e da literatura existente. Informações contidas na base de dados quanto à realidade específica brasileira, embora em pequeno número, foram utilizados.

O inventário, é então, baseado em levantamento primário, que caracteriza e quantifica quanto material um determinado componente necessita para preencher a unidade funcional estabelecida, e a complementação secundária pelos processos do banco de dados do *Ecoinvent*[®] para o preenchimento de informações de obtenção do material. Esta complementação é essencial e amplamente utilizada de modo que os dados disponíveis pelo *Ecoinvent*[®] são Avaliações de Ciclos de Vida de diversos produtos e serviços já realizadas, disponíveis em ordem a viabilizar estudos complexos. Esta situação acontece inclusive para dados da disposição final, quando sabe-se a quantidade de material, a ser reciclado, por exemplo, por meio de medições da empresa (dados primários), complementando-se com dados da indústria de reciclagem (processos secundários) oriundo da base de dados do *software*.

Para esta ACV foram coletados dados de todas as etapas do Sistema de Produto, desde a obtenção das matérias-primas até o final de vida por motivos já descritos em FRONTEIRAS DO SISTEMA. Esta dissertação foi complementada também por dados levantados por Orsi (2011) e Zanghelini (2010).

Especificamente com relação a fase de obtenção de matérias-primas necessárias ao ciclo de vida de sistema de produto escolhido, as informações foram levantadas nos setores de Compras e Fornecedores, Controle de Processos e Engenharia de Produtos da empresa. As embalagens, assim como os transportes dos componentes integrantes do compressor de ar, em sua maioria, também foram incluídos na ACV, dominados por logísticas nacionais e rodoviárias, mas que também apresentaram um ou outro componente transportado internacionalmente por navios cargueiros.

Na etapa de manufatura, os dados foram coletados e/ou estimados segundo medições diretas ou banco de dados dos setores responsáveis pela produção, desenvolvimento e processos dos compressores. Para esta etapa, os setores de Controle de Processos, Engenharia de Produtos,

Central de Descartes, Qualidade e Meio Ambiente, Manutenção, bem como a própria linha de produção.

Desconsideraram-se para esta etapa, dados da produção e destinação final de maquinário e dependências físicas concluindo que a diluição dos impactos dos ciclos de vida destas partes pela produção da unidade funcional definida é de ínfima contribuição para o resultado da ACV (maiores detalhes em 3.10.PRESSUPOSTOS).

Para o levantamento das informações de uso e manutenção dos equipamentos, foram utilizados dados do setor de Teste de Bancada da empresa. Este setor é responsável pelos testes dos equipamentos (garantido sua segurança e correto funcionamento antes de comercializá-los) e pela construção do manual de manutenção do mesmo. Informações como o consumo energético, óleo lubrificante e produção volumétrica foram aqui estimadas para o período de uso. Para a manutenção dos compressores foi utilizado um cenário de troca de peças estimado por este mesmo setor, em ordem a permitir alcançar a vida útil proposta, que é de 10 anos para o equipamento novo e 5 anos para o equipamento remanufaturado.

Do mesmo modo, na fase final do ciclo de vida do sistema de produto, os três cenários de pós-uso foram admitidos conforme possibilidade técnica envolvendo reciclagem, remanufatura e aterramento. Os dados foram estimados pelos setores de Engenharia de Produto, Engenharia/Controle de Processos e Teste/Bancada, contemplando os componentes possíveis de serem reciclados, processos de desmontagem e de remanufatura, aumento de vida útil e possibilidades de reúso de partes do compressor obsoleto.

A logística reversa contou com uma estimativa baseada na concentração industrial por região brasileira e distâncias a partir de municípios estratégicos escolhidos para cada região, com o intuito de abranger todo o país, em um cenário hipotético de retorno dos equipamentos até a sede da empresa em Joinville, Santa Catarina. Informações do tipo de transporte e combustível foram aplicadas a partir da base de dados do *Ecoinvent*[®], e portanto, de origem secundária (cenário detalhado no item 3.4.1.).

3.7. AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Esta ACV foi realizada com o auxílio do *software SimaPro*[®], versão 7.3. *Multi User Classroom*, de licença adquirida pelo Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG) do departamento de

Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

O método escolhido para a análise dos impactos ambientais associados a cada cenário foi o *CML 2000 (baseline)*, desenvolvido pelo Centro de Ciência Ambiental da Universidade Holandesa de Leiden (*Faculty of Science, Institute of Environmental Sciences, Leiden Universiteit*). Ele quantifica os impactos ambientais, passando pelo procedimento de identificação de substâncias geradoras do impacto, classificando-as à determinada categoria de impacto ambiental e caracterizando-as conforme os modelos de caracterização adotados pelo método. Deste modo, o *CML 2000 (baseline)* apresenta os impactos na forma de indicadores de impacto ambiental, normalmente um indicador de equivalência para todas as emissões (ou impactos) classificadas para determinada categoria.

As categorias são mecanismos comuns (por exemplo, mudanças climáticas) ou agrupamentos comumente aceitos (ecotoxicidade). Os dados para as categorias de impacto *CML 2000* estão de acordo com as informações do Instituto de Ciências Ambientais, publicado em um manual e baseado em vários autores diferentes (LEIDEN UNIVERSITEIT, 2011). Este método aborda as categorias de impacto: (i) Depleção de Recursos Abióticos; (ii) Acidificação; (iii) Eutrofização; (iv) Aquecimento Global; (v) Depleção da Camada de Ozônio; (vi) Toxicidade Humana; (vii) Toxicidade de Água Doce; (viii) Toxicidade da Água Marinha; (ix) Ecotoxicidade Terrestre; (x) Oxidação Fotoquímica.

Escolheu-se para este estudo duas categorias de impacto, priorizando aquelas que refletissem uma maior comunicabilidade e interesse. Aquecimento Global, expressa em quilogramas de CO₂ equivalente, por meio da caracterização proposta pelo IPCC e a categoria de Depleção de Recursos Abióticos, cujo indicador da categoria é kg de antimônio equivalente; À estas duas categorias, acrescentou-se outras duas. A Demanda Total de Energia Acumulada, expressa em MJ equivalentes, seguindo as recomendações para a avaliação de impacto da Diretiva 2005/32/EC da Comissão Européia, que propõe requisitos para o *ecodesign* de produtos usuários de energia (UNIÃO EUROPÉIA, 2003), e também, uma quarta categoria de impacto que compreende a ocupação de solos, chamada de Uso de Terras, cujo indicador é m²-ano, buscando entender as relações de ocupação dos cenários envolvidos, principalmente pelo fato de um deles envolver o aterramento sanitário cujo grande limitante é a área

disponível. Esta última é uma categoria oriunda do método *CML Baseline 2001*.

3.8. INTERPRETAÇÃO

A interpretação deste estudo está ligada a comparação entre os Cenários de pós-uso do compressor de ar e dos resultados sob influência da variação da fronteira do Sistema para as quatro categorias de impacto analisadas.

Primeiramente, buscou-se uma visão mais ampla, por meio de uma análise primária de todas as categorias de impacto do método *CML 2000* e mais as duas categorias adaptadas. Esta interpretação teve como objetivo posicionar os cenários de acordo com as demais categorias de impacto, e, mesmo que pouco aprofundada, ampliar o posicionamento dos cenários com relação ao desempenho ambiental além das quatro categorias escolhidas para maiores detalhamentos. Posteriormente, compararam-se os cenários de pós-uso dos equipamentos obsoletos e seus impactos ambientais, evidenciando então as principais origens ou gargalos dos sistemas, concluindo com o cenário de melhor desempenho ambiental para as categorias escolhidas segundo o método de avaliação do inventário utilizado. Para a escolha do cenário de melhor desempenho ambiental, as fronteiras foram definidas englobando todas as etapas do ciclo de vida do sistema de produto.

Para a análise de sensibilidade, variou-se as fronteiras como já mencionado em 3.5.FRONTEIRAS DO SISTEMA, e buscou-se entender as relações e influências do seu posicionamento para os resultados finais, e por conseguinte, para a escolha dos cenários.

3.9. REQUISITOS DOS DADOS

A abrangência da qualidade dos dados buscou respeitar quatro condições, dentre aquelas propostas pelas normas, de modo a diminuir o grau de incerteza dos resultados:

(1) Cobertura temporal não superior a 5 anos para dados primários, e 20 anos para dados secundários;

(2) Cobertura geográfica do local de interesse para dados primários (sejam aqueles originários na Empresa Schulz S/A ou em quaisquer outros prestadores de serviços dos ciclos de vida do compressor analisado). Quando se fez necessário o uso de dados secundários, a cobertura geográfica não pôde ser restringida, uma vez que poderia inviabilizar o estudo. No entanto, sempre que possível

optou-se por dados mais próximos da realidade desta ACV ou a adaptá-los de modo a representarem este sistema de produto.

(3) Cobertura tecnológica: condizente com a realidade enquanto dados primários e o mais próximo possível dela para dados secundários.

(4) As fontes dos dados: quando possíveis, foram sempre primárias com eventual complementação secundária. Nas etapas de uso/manutenção e disposição final, cenários foram assumidos conforme orientação da empresa.

Os demais requisitos buscaram reproduzir, quando possível, a realidade da indústria (Schulz S/A), ou distanciar-se o mínimo possível dela (principalmente na aplicação de dados secundários).

3.10. PRESSUPOSTOS

Alguns pressupostos foram assumidos em ordem a viabilizar o fechamento do ciclo de vida do Sistema. Estas adoções são essenciais para que um limite seja proposto, acrescentando um final à cadeia produtiva, que caso contrário, poderia entrar em um “*loop*” infinito de matéria e energia.

O primeiro pressuposto diz respeito ao maquinário utilizado para a aquisição de matérias-primas, transformação das mesmas em materiais que entram nos processos elementares, equipamento de manufatura de componentes e equipamentos da linha de produção (manufatura do compressor) e dependências físicas (como galpões). Como descrito no item 3.6. atribui-se à fabricação e disposição final destes equipamentos e construções, nenhum impacto ambiental se relacionada à unidade funcional. Esta afirmação se apoia na diluição destes impactos ambientais no decorrer da vida útil dos mesmos por sua capacidade de produção de compressores durante este período para atingir a U.F. Por exemplo, uma máquina guilhotina para cortar chapas metálicas: na contabilização de impactos ambientais não será considerado o equipamento físico, guilhotina, em kg de guilhotina consumida por cada chapa, entendendo que a máquina cortará muitas chapas em todo o seu longo período de vida. De modo que o impacto desta máquina dividido para cada chapa cortada (referente a um compressor) em todo o seu período de uso é desprezível para as definições de objetivo e escopo desta ACV.

O segundo pressuposto é aquele descrito na item 3.4.1.Cenário De Logística Reversa, o qual atribui maior geração de “compressor descartado” para regiões brasileiras com maior concentração industrial (IBGE 2010). Entende-se que uma região com maior número de

indústrias consome mais unidades do equipamento compressor de ar e por conseguinte o descarta após o final de sua vida útil.

Na sequência, o pressuposto de vital importância para a criação de cenários, é aquele que contabiliza as frações materiais do compressor para posterior destinação. O modo encontrado para esta contabilização foi o somatório das frações materiais empregadas na composição do compressor, assim, para os cenários de pós-uso trabalhou-se com quantidades em kg de determinados materiais da sua composição. Este mesmo modelo de contabilização foi utilizado por Simboli *et al.* (2011), que definiram cenários para a disposição final de uma motocicleta com base em frações de materiais dos componentes (envolvendo reciclagem e remanufatura). Neste sentido, assume-se que a embalagem de envio do equipamento (quando novo) é descartado na entrega, tratando-se de um descarte pós-venda e não um descarte pós-consumo (equivalente a 27,9 kg do equipamento, vide linha 04 da

Tabela 10) para os três cenários. Este material não é contabilizado dentro das frações para os cenários.

Considera-se também a separação dos materiais em componentes compostos. Este pressuposto recai principalmente para os cenários RC e RM, apoiando-se na possibilidade de total separação dos materiais dos componentes compostos. Por exemplo, o componente 'vareta de óleo c/ inserto (m18) e respiro cônico' é composto por dois materiais: polipropileno e latão. Com base em dados dos setores de produção contabiliza-se uma quantidade utilizada em massa de cada material a ser destinada após o uso, e portanto, para os Cenários citados a separação dos mesmos.

Na reciclagem (cenários RC e RM), como já explicado anteriormente, associa-se ao material reciclado o impacto ambiental evitado de se produzir o mesmo a partir de matéria-prima virgem, ou seja, a concepção de produto evitado na proporção de que 100% do material reciclado evitaria a produção de 100% do mesmo material a partir de fontes virgens ou primárias.

Ainda, com relação a RC e RM, considerou-se o motor (unidade motriz) retornado inteiramente a WEG S/A, representando 20,96 kg da massa total do compressor (vide linha 03 da

Tabela 10) quando ocorre a desmontagem na linha, entendendo que ao separar tal unidade do restante, a empresa fabricante torna-se responsável pelo equipamento (assim como a Schulz S/A é pelo compressor obsoleto).

Com relação ao acréscimo de vida útil de 05 anos que o compressor remanufaturado adquire no Cenário RM, atribui-se à esta sua fase secundária de uso e manutenção, metade das entradas, saídas e produção de ar comprimido da fase primária de uso e manutenção (10 anos) como demonstrado na

Figura 21. Tornando a contabilização desta fase idêntica para os três cenários, uma vez que o AS e o RC totalizam 3 etapas de 10 anos de uso e manutenção enquanto que o RM totaliza 2 etapas (10 anos) e mais 2 meias etapas (05 anos cada), permitindo-se na análise comparativa e a retirada desta etapa para evidenciar impactos ambientais associados a cada cenário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões desta dissertação estão descritos conforme divisão em quatro ítems: Inventário do Ciclo de Vida (IVC), Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), Análise Crítica e Recomendações.

O inventário refere-se aos dados levantados para satisfazer os objetivos da ACV, conforme escopo definido primariamente (em metodologia). A AICV aborda e descreve os resultados obtidos pela aplicação do método de avaliação de impactos escolhido, quantificando os potenciais impactos do ciclo de vida do sistema de produto de acordo com cada cenário. A análise crítica aponta os pontos carentes da ACV culminando com as recomendações, muitas delas geradas a partir desta análise crítica.

4.1. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Os dados inventariados foram divididos de acordo com as quatro principais etapas do ciclo de vida do Sistema de Produto: aquisição de matérias-primas, manufatura, uso/manutenção e pós-uso.

4.1.1. Aquisição de Matérias-Primas

A aquisição de matérias-primas está relacionada com todo o ciclo de vida do sistema de produto, mais intimamente com a etapa de manufatura, em que as mesmas convergem para formar o produto. Considerou-se “Aquisição de Matérias-Primas” os componentes que entram na linha de produção do compressor. A listagem dos materiais, composições, processos produtivos de beneficiamento, distâncias

percorridas desde o fornecedor, bem como embalagens utilizadas, está apresentada no APÊNDICE 3 (para matérias-primas envolvidas na produção do reservatório de ar, Zanghelini, 2010).

O fluxograma dos processos de manufatura e inserção de componentes do compressor, e portanto, matérias-primas, pode ser visualizado no APÊNDICE 2.

4.1.2. Manufatura

Assim como a aquisição de matérias-primas, os dados coletados da manufatura do Sistema de Produto estão expostos mais detalhadamente no APÊNDICE 4. Os processos elementares envolvidos na produção do compressor CSL 20BR podem ser visualizados de maneira resumida na Tabela 5.

A Coluna ‘S’ (Tabela 5) apresenta os Subconjuntos, que são componentes intermediários, oriundos da montagem de componentes mais simples. A coluna ‘Nº’ apresenta o número total de processos para a manufatura do compressor de ar, totalizando 29 processos elementares.

A Coluna ‘H’ demonstra a hierarquia dos processos, sendo que o número maior precede o número menor culminando com o produto pronto no processo elementar de número 1 (‘Bloco’). Para auxílio ao entendimento dos processos, vide APÊNDICE 2, que apresenta o fluxograma dos processos.

Alguns dos componentes do APÊNDICE 3 possuem processos elementares de manufatura desde a sua fundição e usinagem. O acesso à esta informações pôde ser viabilizado, uma vez que, a empresa conta com setores de fundição e usinagem, e, alguns componentes que perfazem o compressor são originados nestes setores. Os processos de manufatura do reservatório de ar foram obtidos em Zanghelini, (2010).

Tabela 5. Processos elementares de manufatura do sistema de produto: compressor CSL 20BR.

MANUFATURA				
S	Nº	H	Processo Elementar	Descrição
Placa de Válvula	29	6	Corte a Laser	<i>Corte a laser das palhetas.</i>
	28	5	Tamboreamento	<i>Tamboreamento das palhetas cortadas.</i>
	27	6	Usinagem Placa de Válvula	<i>Usinagem da placa de válvula fundida.</i>
	26	5	Retífica Placa de Válvula	<i>Retificação da placa de válvula usinada.</i>
	25	4	Subconjunto Placa de Válvula	<i>Montagem dos demais componentes com a placa de válvula retificada e a palheta tamboreada.</i>

MANUFATURA					
S	Nº	H	Processo Elementar	Descrição	
Biela	24	6	Usinagem Corpo e Capa de Biela	<i>Usinagem do corpo e capa da biela coquilhadas.</i>	
	23	5	Subconjunto Biela 1	<i>Posto de montagem de alguns componentes formadores da biela AP.</i>	
	22	4	Subconjunto Biela 2	<i>Posto de acréscimo de rolamento à biela AP.</i>	
Eixo	21	6	Usinagem do Eixo	<i>Usinagem do eixo fundido, tratamentos superficiais e acabamentos.</i>	
	20	5	Retífica do Eixo	<i>Retificação do eixo usinado.</i>	
	19	4	Subconjunto Eixo	<i>Acréscimo de componentes ao eixo retificado.</i>	
Flange	18	5	Usinagem Flange	<i>Usinagem do flange fundido.</i>	
	17	4	Subconjunto Flange	<i>Posto de acréscimo de componentes ao flange usinado.</i>	
Cilindro	16	5	Usinagem do Cilindro	<i>Usinagem do cilindro fundido.</i>	
	15	4	Brunimento do Cilindro	<i>Tratamento superficial de brunimento para retificação da superfície.</i>	
Pistão	14	5	Usinagem do Pistão	<i>Usinagem do pistão fundido.</i>	
	13	4	Subconjunto Pistão	<i>Posto de acréscimo/montagem de componentes ao pistão usinado</i>	
Carte	12	4	Usinagem do Carter	<i>Usinagem do Carter fundido.</i>	
BBP	11	4	Subconjunto Biela Bipartida	<i>Posto de montagem dos componentes do subconjunto biela bipartida (BBP).</i>	
Bloco 1	10	3	Montagem de Bloco	<i>Posto de montagem dos demais componentes formadores do bloco 1 com os subconjuntos hierarquizados anteriormente.</i>	
	9	2	Pintura de Bloco	<i>Pintura do bloco 1.</i>	
PS	8	2	Subconjunto Pressostato	<i>Estágio de montagem dos componentes formadores do subconjunto pressostato (PS).</i>	
Meta	7	2	Preparação do Motor	<i>Posto de preparação do motor (meta), acréscimo de componentes ao corpo do motor.</i>	
Volante	6	3	Usinagem do Volante	<i>Usinagem do Volante fundido.</i>	
	5	2	Pintura Volante	<i>Pintura do volante usinado.</i>	
Bloco	4	1	Montagem Final	<i>Posto final, acréscimo dos demais componentes ao bloco 1 e subconjuntos hierarquizados anteriormente.</i>	
	3	1	Embalagem	<i>Embalagem para transporte.</i>	
	2	1	Transporte Linha/Expedição	<i>Movimentação interna.</i>	
	1	1	Transporte Expedição/Caminhão	<i>Movimentação interna.</i>	

4.1.3. Uso e Manutenção

Para o levantamento de dados da etapa de uso e manutenção, tomou-se por base as informações do setor de teste de equipamentos para quantificar o consumo energético, de óleo lubrificante e geração

volumétrica de ar durante o período de funcionamento estipulado, 40.000 horas. Este período corresponde a 10 anos, ou seja, um ciclo de uso, considerando que o sistema esta operando durante 11 horas diárias.

Neste período, o compressor de ar produziu um montante volumétrico de ar de aproximadamente 1,1 milhão de metros cúbicos de ar comprimido a uma pressão de 7,50 BAR (Tabela 6). A Unidade Funcional baseou-se nesta produção, como descrito em 3.3. **DEFINIÇÃO DA UNIDADE FUNCIONAL.**

Tabela 6. Dados de uso do Sistema de Produto para um funcionamento de 40.000 horas.

USO		
Sistema de Produto	Volume de Ar Gerado (m³)	Pressão (BAR)
CSL20 BR	1.100.800,00	7,50

Os consumos desta etapa do ciclo de vida são: a energia elétrica para operação da unidade motriz e o óleo lubrificante que busca diminuir o atrito das partes pistão, cilindro e biela. Este óleo lubrificante deve ser repostado de tempos em tempos, assim como o remanescente deve ser retirado. A estimativa de consumo é de 20 litros por ano (totalizando 200 litros em 10 anos de uso), enquanto que o remanescente corresponde a 13,7 litros anuais (137 litros em 10 anos). A diferença entre o consumo e o descarte se relaciona à fração evaporada e absorvida pelo calor gerado pelo pistão. Os valores dos consumos e gerações da etapa de uso do compressor estão compilados na Tabela 7.

Tabela 7. Consumos e gerações da etapa de uso do compressor.

USO					
Consumos	Un.	Quantidade	Geração	Un.	Quantidade
Energia Elétrica	kW·h	4,71	-	-	-
Óleo Lubrificante	L	200	Óleo Lubrificante	L	137,82

Com relação à manutenção do compressor, a identificação de componentes a serem trocados durante este período respeitou o plano de manutenção dos equipamentos conforme componentes internos do sistema.

Algumas peças não foram contabilizadas por serem parte de um componente composto e não constarem nas listagens de componentes do Sistema da Schulz S/A com códigos internos do setor de engenharia e processos. No entanto, para os resultados comparativos esta ausência de

dados não causa influência uma vez que esta fase é equalizada para os três cenários avaliados.

As peças trocadas durante a manutenção de modo a garantir o período de uso estão compiladas na Tabela 8, que também identifica os componentes que não foram contabilizados nesta etapa do ciclo de vida.

Tabela 8. Peças trocadas, conforme projeção de manutenção e considerando a vida útil proposta.

MANUTENÇÃO		
Peças Contabilizadas	Un.	Quant.
PCS (3/8"x7/8*;1/4"x3/4*;3/8*1.1/4*;3/8*x1*;5/16x1*;5/16*x1 1/4)	Peça	27
MANOM V 250 21/4NPT e VALV SEG 1/4* ASME185	Peça	20
CORREIA A- 64 *V*	Peça	20
PURG 1/4 NPT SAIDA INFERIOR	Peça	20
ANEL TRAVA 16MMPARA FUIROS	Peça	13
VALV RET 3/4*NPT M	Peça	3
RETENTOR 30 x 50 x 10mm SABO 00358 BR-L-NBR	Peça	3
ROLAMENTOS (rígido de esferas 6204 / agulha ina f-90525 / 6306)	Peça	3
SERP DESC CSL20BR 200L.	Peça	3
PRESS AUTOM 135 175 PSIG	Peça	3
BIELA BP BIPARTIDA MSL20MAX CJ	Peça	2
CIL MSL20MAX BALUSINADO	Peça	2
PIST AP 2* WTV20G	Peça	2
EIXO MAN MSL20MAXBALANC USINADO	Peça	2
FILTRO 3/4 NPT PLASTICO	Peça	2
Peças não Contabilizadas	Un.	Quant.
FILTRO DE AR (MANTA PP, POLIESTER E BORRACHA)	Peça	133
JOGO DE JUNTAS	Peça	40
REPARO DA VÁLVULA	Peça	40
REPARO DA VÁLVULA DE RETENÇÃO	Peça	40
ROLAMENTOS DO FLANGE	Peça	4

4.1.4. Pós-Uso

O cenário de pós-uso (independente do encaminhamento final) é considerado como tendo seu início no descarte do equipamento obsoleto por parte do consumidor no centro regional de descartes após a fase de uso. A partir de então os três cenários se desenvolvem começando com a logística reversa do compressor, como descrito no item 3.4.1.

Com relação à logística reversa, a unidade de inserção de dados de transporte no *software SimaPro*[®] é o t.km. Assim, têm-se uma

relação de distância pela massa transportada o que permite contabilizar diferentes parcelas transportadas de uma única unidade de compressor obsoleto (respeitando a unidade funcional).

A Tabela 9 apresenta as porcentagens e o relativo em massa, de ‘produto obsoleto’ associada a cada região, que foram estimadas a partir do número de indústrias. Enquanto que a Figura 25 esquematiza o cenário proposto de logística, dividindo o compressor de acordo com estas porcentagens e suas regiões.

Tabela 9. Estimativa de porcentagem por região de produto obsoleto recebido nos centros de recebimento regionais e distâncias assumidas.

CENÁRIO DE LOGÍSTICA REVERSA					
Região	Indústrias	Compressor (kg)	Dist. (km)	Município	t-km
Sul	28%	41,8292	200	Florianópolis, SC	8,37
Sudeste	52%	77,6828	550	São Paulo, SP	42,7
Centro-Oeste	6%	8,9634	1200	Campo Grande, MS	10,8
Nordeste	11%	16,4329	2500	Salvador, BA	41,1
Norte	3%	4,4817	3000	Marabá, PA	13,4
Total	100%	149,39	7450	-	116,37

Outra contabilização, também comum aos três cenários e que será a base para a destinação deste equipamento, após o retorno do compressor obsoleto conforme abordado nos pressupostos, é a sua composição, em massa de matéria-prima utilizada na fabricação (Tabela10).

Figura 25. Porcentagens do produto obsoleto recebido em cada região para o cenário de logística reversa proposto.

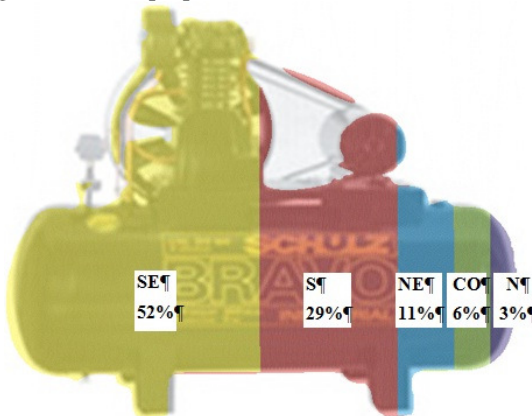


Tabela 10. Somatório das frações das matérias-primas empregadas no compressor de ar.

FRAÇÕES MATERIAIS (CENÁRIOS AS, RC e RM)			
Fração	Status	Quantidade	Un.
Aço	Dependente do Cenário	86,334	kg
Ferro Fundido	Dependente do Cenário	36,965	kg
Motor	Dependente do Cenário	20,961	kg
Madeira (embalagem)	Descartado pelo Consumidor	27,900	kg
Alumínio	Dependente do Cenário	1,3061	kg
Cobre	Dependente do Cenário	0,790	kg
Latão	Dependente do Cenário	0,613	kg
ABS	Dependente do Cenário	0,025	kg
Polipropileno	Dependente do Cenário	0,172	kg
Nylon	Dependente do Cenário	0,001	kg
PEBD	Dependente do Cenário	0,002	kg
Papel	Dependente do Cenário	0,001	kg
PE	Dependente do Cenário	0,011	kg
Poliéster	Dependente do Cenário	0,608	kg
Papel	Dependente do Cenário	0,291	kg
Papelão	Dependente do Cenário	0,359	kg
PVC	Dependente do Cenário	0,053	kg
Óleo	Dependente do Cenário	0,900	kg
Total	-	177,294	kg
Total	Dependente do Cenário	149,394	kg
Total	Descartado pelo Consumidor	27,900	kg

Adaptado: Orsi (2011).

Especificamente para o Cenário AS, após a chegada do compressor à sede da empresa, o mesmo segue ao aterro localizado no distrito industrial de Joinville. O equipamento necessita ser movimentado do caminhão que chega da logística reversa até aquele que encaminha-o para o aterro. A movimentação é realizada por uma empilhadeira (*'forklift'*) comum movida à combustão de gás natural.

Todas as frações (

Tabela 10), com exceção da embalagem, descartada pelo consumidor como descrito nos pressupostos, seguem para aterro sanitário localizado a 5 km do local de recebimento. As especificações dos 149,394 kg transportados ao aterro estão na Tabela 11.

Tabela 11. Distâncias e transportes assumidos para a destinação final do Cenário AS.

TRANSPORTES APLICADOS (CENÁRIO AS)			
Fração/Materiais	Status	Distância	Un.
Aterráveis	Transportado ao aterro de Joinville, por carreta de até 21 ton. de capacidade	5	km

Nos outros dois cenários, após a logística reversa do compressor, e da movimentação interna para o recebimento, os mesmos passam por um processo de desmontagem. O processo é o mesmo independente se a sequência é a reciclagem ou a remanufatura, e compreende uma estimativa envolvendo o gasto energético e de ar comprimido para ativar ferramentas (elétricas ou pneumáticas) semelhantes as da montagem, porém com o objetivo de separar os materiais do compressor obsoleto. Os processos e consumos estão listados na Tabela 12.

Tabela 12. Processos de desmontagem e seus consumos nos cenários RC e RM.

PROCESSOS DE DESMONTAGEM (CENÁRIOS RC e RM)			
Processo Elementar	Consumo	Unidade	Quantidade
Desmontagem Final	Energia Elétrica	kW·h	0,1600
	Ar Comprimido	m ³	0,3954
Desmontagem Bloco	Energia Elétrica	kW·h	0,0300
	Ar Comprimido	m ³	0,6080
Desmontagem Motor	Energia Elétrica	kW·h	0,0016
	Ar Comprimido	m ³	0,0100
Desmontagem Sub Pressostato	Energia Elétrica	kW·h	0,0047
Desmontagem Sub Eixo	Energia Elétrica	kW·h	0,0146
Desmontagem Sub Biela	Energia Elétrica	kW·h	0,0565
	Energia Elétrica	kW·h	0,0565
Desmontagem Biela Bipartida	Ar Comprimido	m ³	0,0880
	Energia Elétrica	kW·h	0,0596
Desmontagem Sub Flange	Energia Elétrica	kW·h	0,0005
	Ar Comprimido	m ³	0,2640

No *software*, a inserção dos dados foi realizada pelo somatório dos consumos, uma vez que o objetivo desta ACV não foi identificar etapas de maior geração de impacto ambiental (na desmontagem), e sim, cenários assumidos. Assim, criou-se um processo único chamado de desmontagem (Tabela 13), o qual correspondeu a dois consumos, de energia elétrica e ar comprimido relativos ao somatório de todas as etapas (Tabela 12).

Tabela 13. Consumos do processo único de desmontagem do compressor.

DESMONTAGEM (CENÁRIOS RC e RM)			
Processo Elementar	Consumos	Unidade	Quantidade
Desmontagem	Energia Elétrica	kW·h	0,384
	Ar comprimido	m ³	1,365

Após o processo único de desmontagem RC e RM divergem com relação à destinação e tratamento das frações/componentes do compressor obsoleto.

Primeiramente, para o cenário RC, assume-se que as frações de aço e ferro fundido (incluindo os reservatórios) são enviados ao setor de fundição da própria Schulz S/A, e então são refundidos e retornam ao ciclo metálico destes materiais na forma de produto evitado. Quanto às demais frações recicláveis, assume-se que são processados com base em processos de reciclagem existentes na base de dados do *Ecoinvent*[®], ou na ausência de tais dados, conforme os seus processos de fabricação primária (aquisição a partir das reservas naturais) com exceção à obtenção da matéria-prima virgem, que então é preenchida pelos materiais enviados do sistema. Essas frações recicladas são também contabilizadas como produtos evitados. Há, portanto, o impacto da reciclagem propriamente dita, este negativo, devido à consumos e gerações, mas por outro lado há também o impacto evitado do produto resultante, que corresponde à um impacto ambiental positivo. Os materiais não recicláveis são contabilizados pelo transporte e deposição em aterro industrial. Quanto ao motor, assume-se que será retornado ao fornecedor, WEG Motores, incluindo somente o transporte do mesmo.

A Tabela 14 lista as principais frações materiais do Sistema com suas devidas disposições finais adotadas após os processos de desmontagem, enquanto que a Tabela 15 aponta os transportes e as distâncias assumidas para o encaminhamento das frações segundo as devidas disposições finais, para o cenário RC.

Tabela 14. Frações refundidas, recicladas, aterradas e demais adoções para o Cenário RC.

FRAÇÕES MATERIAIS (CENÁRIO RC)			
Fração	Status	Quantidade	Un.
Aço	Refundido (Schulz S/A)	86,334	kg
Ferro Fundido	Refundido (Schulz S/A)	36,965	kg
Motor	Retornado ao Fabricante (WEG S/A)	20,961	kg
Eng. Madeira (embalagem)	Descartado pelo Consumidor	27,900	kg
Alumínio	Reciclado	1,3061	kg
Cobre	Reciclado	0,790	kg
Latão	Reciclado	0,613	kg
ABS	Reciclado	0,025	kg
Polipropileno	Reciclado	0,172	kg
Nylon	Reciclado	0,001	kg
PEBD	Reciclado	0,002	kg
Papel	Reciclado	0,001	kg
Poliétileno	Aterrado	0,011	kg
Poliéster	Aterrado	0,608	kg
Papel Contaminado	Aterrado	0,291	kg
Papelão Hidráulico	Aterrado	0,359	kg
PVC	Aterrado	0,053	kg
Óleo	Aterrado	0,900	kg
Total	Refundido	123,299	kg
Total	Reciclado	2,910	kg
Total	Aterrado	2,222	kg
Total	Retornado ao Fabricante	20,961	kg
Total	Descartado pelo Consumidor	27,900	kg

Adaptado: Orsi, 2011.

As frações aço e ferro fundido distam o equivalente a 0,3 km entre as divisões ‘Compressores’ e ‘Automotiva’, esta última responsável pela fundição de peças, dentro da sede da empresa em Joinville. O motor retorna à empresa WEG S/A que dista aproximadamente 46 km do distrito industrial, distância assumida entre Joinville e Jaraguá do Sul. Atribuiu-se ainda as distâncias de 100 km e 5 km para as frações recicláveis e aterráveis respectivamente, com base no aterro sanitário existente próximo a Schulz S/A dentro do distrito industrial e nos sucateiros e recicladores da região nordeste de Santa Catarina. Todas estas frações necessitam de movimentação interna depois de desmontadas, transportando-as do desmonte até a expedição

local em que se encontram os meios de transporte. Frações, transportes e distâncias estão compiladas na Tabela 15.

Tabela 15. Distâncias e transportes assumidos para a destinação final do Cenário RC.

TRANSPORTES APLICADOS (CENÁRIO RC)			
Fração/Materiais	Status	Distância	Un.
Aço e Ferro Fundido	Transporte ao setor de fundição da Schulz S/A realizado por caminhão.	0,3	km
Motor (Meta)	Transportado à Jaraguá do Sul (retornado ao fabricante, WEG motores) por carreta de até 21 ton. de capacidade	46	km
Demais Recicláveis	Transportado ao reciclador ou sucateiro intermediário por carreta de até 21 ton. de capacidade	100	km
Demais Aterráveis	Transportado ao aterro de Joinville por carreta de até 21 ton. de capacidade	5	km
Movimentação Interna	Movimentação das frações por empilhadeira a gás, considerando aqui, um consumo de gás (não distância percorrida).	-	-

O terceiro cenário analisado é a remanufatura do compressor (RM). Este é o cenário mais complexo entre todos aqueles analisados nesta ACV, pois envolve mais processo elementares pós consumo e o retorno do compressor à etapa de uso e manutenção acrescentando ao mesmo 05 anos de vida útil.

Após o processo de desmontagem, os componentes são separados em três partes: aqueles não aproveitáveis; componentes diretamente reaproveitáveis e componentes que são reaproveitáveis mas que necessitam de algum processo de remanufatura.

Os que não podem ser reutilizados, compilados na Tabela 16, são aqueles que por motivo de segurança (caso do reservatório que perde espessura durante os 10 anos da primeira fase de utilização), ou mesmo por inviabilidade técnica de funcionar por mais 05 anos nesta segunda utilização, são descartados, sendo encaminhados ou para a fundição ou para a reciclagem (se possíveis de reciclar) ou ainda para o aterramento no caso de resíduos não recicláveis.

Os componentes encaminhados para fundição são aqueles de composição de aço (baixa carbono, laminado, inox, bicromatizado, galvanizado) e ferro fundido, que possam conformar as ligas metálicas das peças fundidas na empresa. As frações recicláveis são aquelas que detêm valor de mercado, como as peças de cobre, alumínio ou latão. Por fim, aquelas que seguem para o aterro, possuem como composição

polímeros que dificultam a separação e/ou reciclagem ou estão contaminadas com óleo (como o papel hidráulico).

Tabela 16. Componentes não aproveitáveis para a remanufatura do compressor (RM) e a destinação proposta.

COMPONENTES NÃO APROVEITÁVEIS (CENÁRIO RM)			
Componente (Sistema Interno)	Status	Quant.	Un.
RESERVATÓRIO DE AR	Refundido (Schulz S/A)	69,173	kg
Eng. Madeira (embalagem)	Descartado pelo Consumidor	27,900	kg
CHAVETA MEIA-LUA	Refundido (Schulz S/A)	0,005	kg
PALHETAS	Refundido (Schulz S/A)	0,024	kg
BAT PALHETA	Refundido (Schulz S/A)	0,024	kg
BATENTE PALHETAMSL	Refundido (Schulz S/A)	0,024	kg
ROLAMENTO AGULHA	Refundido (Schulz S/A)	0,015	kg
ROLAMENTO RIGIDO DE ESFERAS	Refundido (Schulz S/A)	0,100	kg
ROLAMENTO	Refundido (Schulz S/A)	0,346	kg
PACC M3x0,5x8mm	Refundido (Schulz S/A)	0,012	kg
RETENTOR 30 x 50 x 10mm	Refundido (Schulz S/A)	0,020	kg
PINO PIST	Refundido (Schulz S/A)	0,038	kg
ANEL TRAVA 16MMPARA FUROS	Refundido (Schulz S/A)	0,001	kg
KIT NA-7274 2 (MONTAGEM)	Refundido (Schulz S/A)	0,020	kg
KIT NA-7275 90mm (MONTAGEM)	Refundido (Schulz S/A)	0,004	kg
CIL MSL20MAX BALUSINADO	Refundido (Schulz S/A)	8,600	kg
PIST AP 2*	Refundido (Schulz S/A)	0,310	kg
EIXO MAN	Refundido (Schulz S/A)	4,096	kg
PL VAL	Refundido (Schulz S/A)	1,685	kg
ESMALTE SINT.PRETO isento de chumbo	Refundido (Schulz S/A)	0,450	kg
VALV RET 3/4*NPT M	Reciclagem	0,214	kg
BIELA BP BIPARTIDA	Reciclagem	0,171	kg
PIST 90MM BP	Reciclagem	0,471	kg
CORREIA A- 64 *V*	Aterro	0,178	kg
OL SAE 30 ISO 100	Aterro	0,900	kg
JUNTA FLAN	Aterro	0,008	kg
JUNTA INF PLACA	Aterro	0,025	kg
JUNTA CIL	Aterro	0,010	kg
JUN SUP PLAC	Aterro	0,025	kg
FILTRO 3/4 NPT PLASTICO	Aterro	0,360	kg
PRESS AUTOM	Aterro	0,370	kg
VARETA DE OLEO C/ INSERTO	Aterro	0,025	kg
MANOM V 250 21/4NPT	Aterro	0,075	kg
Total	Refundido	84,947	kg
Total	Reciclado	0,856	kg
Total	Aterrado	2,447	kg
Total	Descartado pelo Consumidor	27,9	kg

Adaptado: Orsi, 2011.

As mesmas partes que não puderam ser reaproveitadas (Tabela 16) devem ser repostas por novos e idênticos componentes. Portanto, a Tabela 16 apresenta também os componentes que devem ser repostos no compressor remanufaturado. Os componentes reaproveitáveis, produto dos processos de desmontagem estão listados na Tabela 17.

Tabela 17. Componentes reaproveitáveis para a remanufatura do compressor no Cenário RM.

COMPONENTES APROVEITÁVEIS (CENÁRIO RM)			
Componente (Sistema Interno)	Status	Quant.	Un.
AR PRESSAO DN=1/4* FOSFATIZADA	Reaproveitado	0,002	kg
AR PRESSAO DN=3/8* FOSFATIDADA	Reaproveitado	0,008	kg
AR PRESSAO DN=1/4* FOSFATIZADA	Reaproveitado	0,003	kg
AR PRESSAO DN=5/16*	Reaproveitado	0,003	kg
AR PRESSAO DN=3/8* FOSFATIDADA	Reaproveitado	0,012	kg
PACC 1/4UNCx1.1/4*RI (CL-12.9)	Reaproveitado	0,009	kg
POR SEXT M22x1,5FOSFAT.(CLASSE-10)	Reaproveitado	0,070	kg
AR PRESSAO DN=1/4* FOSFATIZADA	Reaproveitado	0,002	kg
AR PRESSAO DN=1/4* FOSFATIZADA	Reaproveitado	0,002	kg
PASC 1/4x3/8*2A RI	Reaproveitado	0,001	kg
PACC 1/4*x1.1/2*MR	Reaproveitado	0,020	kg
PACC 1/4*x1.1/2*MR	Reaproveitado	0,020	kg
PCS 3/8* UNC x 1*	Reaproveitado	0,108	kg
PACC 3/8*UNCx1 1/2	Reaproveitado	1,800	kg
PCS 5/16* UNC x 1*	Reaproveitado	0,024	kg
PCS 5/16* UNC x 1 1/4*	Reaproveitado	0,015	kg
PACC 1/4UNCx1.3/4*	Reaproveitado	0,011	kg
PCS 3/8* UNC x 7/8*	Reaproveitado	0,064	kg
POR SEXT 1/4*	Reaproveitado	0,008	kg
POR SEXT 3/8*	Reaproveitado	0,032	kg
PCS 1/4* UNC x 3/4*	Reaproveitado	0,012	kg
PCS 3/8* UNC x 1.1/4*	Reaproveitado	0,088	kg
BARRA FIX MOTOR	Reaproveitado	0,500	kg
AR LISA B 7/8*	Reaproveitado	0,060	kg
ESPACADOR d=20.0m	Reaproveitado	0,014	kg
ARRUELA LISA di=6,5 x D12mm.	Reaproveitado	0,002	kg
BUCHA GUIA BIELA	Reaproveitado	0,024	kg
ARRUELA LISA di=6,5 x D12mm.	Reaproveitado	0,002	kg
BUCHA GUIA BIELA MSL20MAX BAL	Reaproveitado	0,024	kg
AR LISA 3/8* BICROMATIZADO	Reaproveitado	0,020	kg
FITA A 0,400x 90	Reaproveitado	0,032	kg

COMPONENTES APROVEITÁVEIS (CENÁRIO RM)

Componente (Sistema Interno)	Status	Quant.	Un.
FIO CONECTOR 1.0mm ² x 70mm para press. comando	Reaproveitado	0,006	kg
TB ALIVIO 20MAX	Reaproveitado	0,007	kg
CORPO AP BIEL USIN BIPART	Reaproveitado	0,128	kg
CAPA BIELA BIPARTIDA USIN	Reaproveitado	0,401	kg
SERP INT	Reaproveitado	0,484	kg
SERP DESC	Reaproveitado	0,305	kg
AR LISA 6,5x11,0x1,0	Reaproveitado	0,001	kg
COT L 1/2* NPT x TB 5/8* (FLANGEADO)	Reaproveitado	0,330	kg
VALV SEG 1/4*	Reaproveitado	0,032	kg
ADES PELICULA67X44mm	Reaproveitado	0,001	kg
ADES LIG PRESS	Reaproveitado	0,001	kg
ADES INF SEGURANCA	Reaproveitado	0,008	kg
ADES CSL20BR/200LBRAVO	Reaproveitado	0,040	kg
ADES INF CSL-20BR 200L	Reaproveitado	0,002	kg
ADES TESTE HIDRO 2	Reaproveitado	0,001	kg
BUJAO 1/4*NPT F.M.	Reaproveitado	0,014	kg
VOL 420 1A	Reaproveitado	11,823	kg
BUJAO 1/4*NPT F.M.	Reaproveitado	0,014	kg
CARTER USINADO.	Reaproveitado	12,580	kg
TAMPA DO CILINDROCSL	Reaproveitado	4,340	kg
FLANGE	Reaproveitado	0,333	kg
POL D=120mm 1xAFURO d=19.05	Reaproveitado	0,960	kg
BUJAO 1/4*NPT F.M.	Reaproveitado	0,014	kg
ETIQ AD DT 70x47,8	Reaproveitado	0,007	kg
TINTA PO POL	Reaproveitado	0,063	kg
BATOQUE PL. 1/2	Reaproveitado	0,002	kg
ABR NYLON 2,6x200(T-18L) PRETA	Reaproveitado	0,001	kg
RIBBON 83mm x300m	Reaproveitado	0,290	kg
ADES PRESSOSTATO DE COMANDO (por/ing/esp)	Reaproveitado	0,001	kg
ETIQ AD ID 42x80mm	Reaproveitado	0,0005	kg
ETIQ ID PECA SAC	Reaproveitado	0,001	kg
ETIQ AD ID 42x80mm	Reaproveitado	0,0005	kg
ADES VALV SEG 185PSI/60SCFM	Reaproveitado	0,00001	kg
ROLAMENTO (motor)	Reaproveitado	0,150	kg
ESTATOR BOBINADO (motor)	Reaproveitado	12,204	kg
CARCAÇA (motor)	Reaproveitado	3,248	kg
ROTOR (motor)	Reaproveitado	5,322	kg
CHAVETA (motor)	Reaproveitado	0,006	kg
HASTES (motor)	Reaproveitado	0,536	kg

COMPONENTES APROVEITÁVEIS (CENÁRIO RM)			
Componente (Sistema Interno)	Status	Quant.	Un.
ROLAMENTO (motor)	Reaproveitado	0,016	kg
TAMPA TRASEIRA (motor)	Reaproveitado	0,863	kg
TAMPA DIANTEIRA (motor)	Reaproveitado	1,240	kg
VENTILADOR (motor)	Reaproveitado	0,065	kg
Total	Reaproveitado	58,83	kg

Adaptado: Orsi, 2011.

Para que, novos e velhos componentes possam ser viabilizados na forma de um compressor remanufaturado, alguns processos elementares são necessários. Estes processos dão sequência à linha de remontagem, na qual os componentes que necessitam são remanufaturados, enquanto que outros processos visam a montagem, reformulação estética e testes de segurança do compressor de ar. As entradas/consumos e saídas/emissões destes processos foram somados em um único processo chamado de remanufatura e constam na Tabela 18.

Tabela 18. Entradas e saídas do processo de remanufatura para RM.

REMANUFATURA (CENÁRIO RM)		
Entradas	Quantidade	Un.
Ar Comprimido	1,277	m ³
Energia Elétrica	0,509	kW·h
Óleo	0,902	kg
Cola Para Vedação	0,0007	kg
Graxa	0,028	kg
Gás	0,570	m ³
Tinta	0,160	L
Solvente	0,040	L
Água	3,437	L
Detergente	0,002	L
Grampos De Aço	0,040	kg
Saídas	Quantidade	Un.
Borra de Cola para Vedação	0,0003	kg
Strash	0,006	kg
Fita Adesiva	0,040	kg
Estopa Contaminada (Graxa e Poeira)	0,002	kg
Plástico	0,037	kg
Graxa	0,025	kg
Água	0,037	L
Estopa Contaminada (Água e Detergente)	0,002	kg

Adaptado: Orsi, 2011.

Com a remanufatura obtemos um produto que pode funcionar por mais 05 anos, o equivalente a metade da vida de um compressor novo, e com o envio e disposição correta das frações não aproveitáveis, têm-se uma gestão correta para o cenário. No entanto, ao final dos 05 anos do produto remanufaturado, quando o mesmo alcança o seu esgotamento funcional, ele deverá ter novamente uma disposição adequada. Neste caso, como não existe a possibilidade de reuso ou remanufatura (após o segundo uso) o compressor segue a linha de disposição do Cenário RC (Tabela 14 e Tabela 15).

O Cenário RM possui ainda particularidades com relação a logística do produto, uma vez que ele retorna à indústria pela logística reversa de pós-consumo, volta a ser enviado ao consumidor (remanufaturado) e depois deve ser aplicada a logística reversa de pós-consumo novamente para o produto esgotado. Além disso, as frações do compressor esgotado que deverão ser dispostas em aterro, recicladas ou refundidas devem ter seus meios de transporte avaliados, da mesma forma que os cenários AS e RC. Assim, este cenário contabiliza quatro processos de logística reversa, referentes ao recebimento pós consumo e ao recebimento do produto esgotado nos 30 anos estipulados para a ACV. Para o transporte das frações da disposição final seguiu-se a Tabela 15.

4.2. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

Pode-se dividir a AICV em duas partes principais que possuem objetivos singulares, embora baseadas na mesma análise.

A primeira delas aborda os resultados dos cenários e a comparação dos valores, cujo objetivo é definir o cenário de melhor desempenho ambiental⁷ dentre aqueles envolvidos na ACV (principal objetivo desta dissertação). Inicia-se com a descrição dos resultados para todas as categorias de impacto ambiental referente ao método empregado (análise geral) mais as duas categorias adaptadas, no item 5.1.1. Posteriormente segue para a descrição dos resultados de cada cenário, iniciando-se com a Logística Reversa, seguido pelo Cenário AS, Cenário RC e Cenário RM. Esta parte da AICV é finalizada com a abordagem comparativa dos valores segundo as categorias de impacto escolhidas.

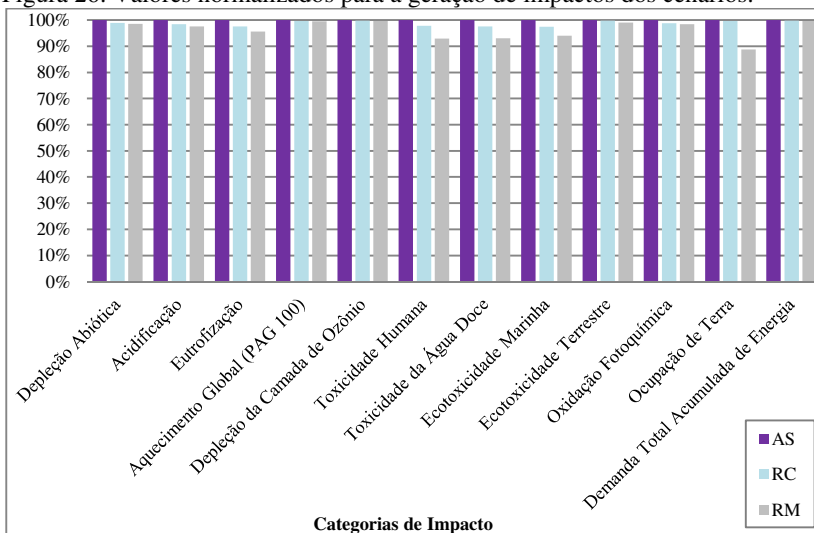
⁷ Desempenho ambiental refere-se, nesta dissertação, à análise das categorias de impacto envolvidas na ACV.

A segunda parte refere-se à análise de sensibilidade das fronteiras do sistema, em que o seu posicionamento foi variado com o objetivo de descrever a sua influência sobre o resultado desta ACV.

4.2.1. Análise Preliminar Geral

O resultado da AICV segundo o método *CML 2000* acrescido das duas categorias de impacto descritas anteriormente, contrapondo os três cenários de pós-uso está apresentado na Figura 26. Neste gráfico, atribuiu-se ao cenário de maior geração de impacto (no caso, o AS) o equivalente a 100% da participação relativa a cada categoria de impacto, de modo a evidenciar a diferença de participações dos demais cenários. Esta prática conhecida como normalização é utilizada na Figura 26 e na Figura 27. Primeiramente todas as categorias de impacto estão demonstradas de forma a transmitir um panorama geral dos cenários estudados e evidenciando aquele de pior e melhor desempenho ambiental.

Figura 26. Valores normalizados para a geração de impactos dos cenários.



Conforme a Figura 26, analisando inicialmente todas as categorias, o Cenário AS foi aquele que indicou os maiores impactos ambientais (colunas na cor roxa), seguido pelo cenário RC (colunas em azul claro) e pelo cenário RM (colunas cinzas). No entanto, esta variação não apresentou-se de forma significativa, sendo da categoria ocupação de terra, a maior diferença, com 11% de melhoria (redução de

área ocupada) entre os cenários RM e AS. Em um hipotético caso onde os cenários resultassem em colocações variadas das categorias, sendo preferível em algumas categorias mas preterível em outras, uma análise ponderada poderia ser realizada pesando as categorias e alcançando uma pontuação única entre os cenários propostos.

A etapa de maior geração de impactos ambientais para o Sistema de Produto é a fase de Uso e Manutenção, quando na contemplação das quatro grande etapas do sistema de produto (Tabela 20, Tabela 22 e Tabela 24). Demonstrou um predomínio quase que total da geração dos impactos ambientais, exceção feita à categoria de impacto de ocupação de terra. Para esta categoria, embora esta fase ainda seja o maior responsável pelo uso de terra, apresenta uma divisão de participação com a aquisição da matéria-prima do equipamento.

O predomínio da fase de uso e manutenção ocorre em detrimento ao elevado consumo energético durante a sua etapa de vida útil do equipamento, que também é elevada (10 anos). Em uma ACV específica de um compressor de ar, realizada por Neri *et al.* (2000a), cuja vida útil assumida foi um período também de 10 anos, os autores enumeram como uma das principais conclusões, o fato de que a fração mais relevante de danos ou dos impactos ambientais ser em decorrência do consumo de energia durante a fase de uso do equipamento (95,6% na análise com o método *Ecopoint* e 98,38% com o método *Ecoindicator*). Como descrito por Klos (2000), o consumo energético é o impacto mais significativo na fase de uso de um compressor de ar.

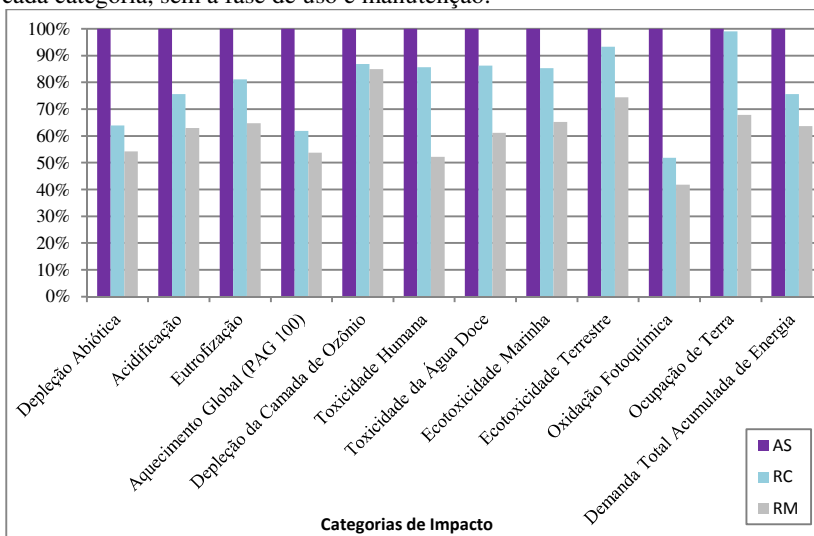
Na essência, um compressor de ar se assemelha à alguns eletrodomésticos, como geladeiras e máquinas de lavar, por sua fase de uso prolongada e por possuírem, cada qual, unidades motrizes e carcaças metálicas, embora normalmente não utilizam óleo lubrificante como o compressor. ACVs conduzidas nos últimos anos, onde o sistema de produto analisado foram eletrodomésticos, atestam esta tendência da fase de uso como detentora da quase totalidade dos impactos. Os autores Otto; Ruminy e Mrotzek, (2006), em uma ACV do berço ao túmulo de vários eletrodomésticos (entre eles refrigeradores, máquinas de lavar pratos, secadoras e lavadoras de roupa) atestam o predomínio desta fase na geração de impactos, com participações superiores a 90% dos impactos ambientais gerados pelos sistemas de produto, associados a um período de vida útil de 10 a 20 anos. Os mesmos autores contabilizam uma participação média inferior á 1% para a disposição final proposta para o estudo, compreendendo a logística reversa e a reciclagem. Elijošiūtė e Varžinskas (2010) também apontam a fase de uso como a

geradora da maior parte dos impactos ambientais para um sistema de produto relativo a um refrigerador/freezer, associado ao alto consumo de energia e também à sua produção, (97% da necessidade elétrica durante a fase de uso). Cullen e Allwood (2009), Johnson (2004), entre outros adquiriram conclusões semelhantes.

Os impactos associados à etapa de uso e manutenção dificultaram a avaliação comparativa dos resultados para a escolha do melhor cenário de pós-uso por ser um grande concentrador dos impactos ambientais. Optou-se pela sua exclusão, como abordado no decorrer do item 4.2. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA, uma vez que é idêntica para os três cenários.

Desta maneira, foi possível melhor evidenciar os desempenhos ambientais de cada cenário proposto, de acordo com as peculiaridades de cada um, apresentados graficamente na Figura 27. Os valores normalizados da geração de impactos ambientais passam a variar em até 58% dentre os cenários, mantendo o posicionamento dos mesmos em AS, RC e RM, do pior para o melhor em desempenho respectivamente, independente da categoria de impacto.

Figura 27. Valores normalizados para a geração de impactos dos cenários para cada categoria, sem a fase de uso e manutenção.



Verifica-se por meio das participações de cada cenário na Figura 27, as variações das categorias de impacto escolhidas para uma análise mais detalhada, como abordado na metodologia, as categorias de

Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Demanda Total Acumulada de Energia e a categoria de Ocupação de Terra.

4.2.2. Cenário Logística Reversa

Apesar de a logística reversa estar inserida em cada cenário, optou-se por apresentar a geração de impacto da mesma primeiramente em separado, para um melhor entendimento desta importante etapa da gestão final do sistema de produto. Posteriormente ela estará compreendida novamente na análise dos três cenários de disposição final, na análise comparativa e na variação de fronteiras na análise de sensibilidade, uma vez que contabiliza-se diferentemente dependendo do cenário de disposição envolvido.

A logística reversa de um compressor conforme estabelecido para este estudo apresenta valores totais de impacto ambiental na Tabela 19 enquanto que as participações de cada rota reversa com origem em cada região do Brasil estão demonstradas na Figura 28. Estes valores são relativos às frações transportadas de pontos estratégicos do solo nacional e contabiliza tanto a distância percorrida quanto a massa deslocada de um compressor obsoleto. Na concepção da ACV as entradas para este cenário são: combustível fóssil (óleo diesel), ‘caminhão’ e ‘rodovia’. Enquanto que as saídas são oriundas da queima do combustível (emissões atmosféricas principalmente) e disposição final dos meios de transportes envolvidos e da própria rodovia, por sua deterioração. Tanto entradas como saídas são relativizadas à unidade funcional (U.F.).

Tabela 19. Impactos ambientais gerados pela logística reversa por rota.

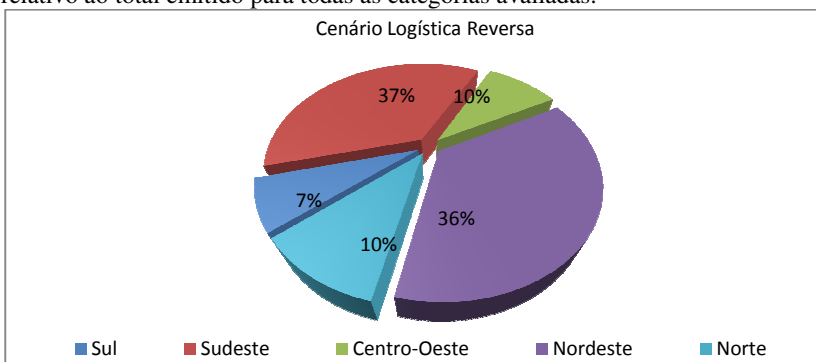
Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² -a
Rota S-S	0,01	1,53	25,20	0,02
Rota SE-S	0,05	7,89	129,60	0,12
Rota CO-S	0,01	2,05	33,74	0,03
Rota NE-S	0,05	7,84	128,79	0,11
Rota N-S	0,02	2,23	36,67	0,03
Total	0,15	21,55	354	0,315

A menor contribuição é decorrente da própria região sul conforme rota estabelecida com origem em Florianópolis (SC). Apesar de movimentar a segunda maior fração em massa do compressor obsoleto, 29%, aplica uma distância de 200 km, muito inferior se comparado com as demais rotas reversas. A segunda menor contribuição é advinda da rota Centro-Oeste-Sul. Esta é responsável pelo transporte

de 6% de um compressor descartado pela distância assumida de 1200 km, ultrapassando a rota sul por transportar o compressor por uma distância muito mais extensa. O trajeto Norte-Sul, apresentou aproximadamente o mesmo impacto ambiental. Apesar de assumir a maior distância de todas, 3000 km entre Marabá (PA) e Joinville, transporta apenas 3% do compressor obsoleto.

As duas maiores participações são dos trajetos Nordeste-Sul e Sudeste-Sul. O primeiro destes é responsável por 36,38% do total dos impactos das categorias escolhidas, enquanto que o segundo apresentou 36,61%. As duas rotas praticamente se equalizam, mas por meios diferentes. Da região NE é contabilizado 11% da massa e do Sudeste 52% do total de 149 kg do equipamento descartado. No entanto, de Salvador (BA) à Joinville (SC) são 2500 km, enquanto que de São Paulo (SP) até a sede da empresa são 550,00 km.

Figura 28. Participações nos impactos ambientais das rotas de logística reversa relativo ao total emitido para todas as categorias avaliadas.



Analisando a origem dos impactos para as categorias, a operação das carretas em detrimento do consumo de óleo diesel é responsável por 76% da depleção abiótica, enquanto que a ‘rodovia’ gera 13% dos impactos pelo consumo de componentes do petróleo em sua construção (principalmente o betume). O próprio veículo é a terceira maior fonte de impactos para esta categoria, com aproximadamente 6% do antimônio equivalente consumido (pelos metais consumidos na sua composição).

Para o Aquecimento Global, o ponto crítico é também a operação das carretas, desta vez em detrimento dos gases oriundos da queima do óleo diesel, com 85% das emissões para esta categoria. Citam-se também as gerações da ‘rodovia’ com 7% e também do veículo com 4,8%. No primeiro caso em virtude do aço reforçado empregado em pontes e estruturas (emissões desde a sua extração e beneficiamento) e,

do veículo, a geração é dividida entre a energia elétrica consumida na manufatura do caminhão e os metais envolvidos na mesma.

Com relação à demanda acumulada total energética, a logística reversa apresenta como *hotspot*, a produção do combustível utilizado pelos caminhões (óleo diesel) com 74% dos MJ eq. necessários, seguido pela ‘rodovia’ e as matérias-primas necessárias para construí-la e mantê-la (betume, principalmente) com 13% da demanda energética e pelo caminhão que requer energia na sua manufatura (5%).

A necessidade anual de área ocupada é oriunda principalmente da operação da rodovia, ou seja, por sua ocupação direta, com 61% dos 0,315 m²·a. O restante é dividido entre a extração da brita utilizada na construção do substrato da rodovia e entre fabricação, manutenção e operação do caminhão.

4.2.3. Cenário AS

O impacto gerado pelo ciclo de vida do compressor conforme pós-uso de Aterramento Sanitário, para as categorias analisadas está listado na Tabela 20. A linha ‘Total’ diz respeito ao fornecimento da unidade funcional (para os 30 anos).

Tabela 20. Impactos gerados segundo etapas do ciclo de vida do produto.

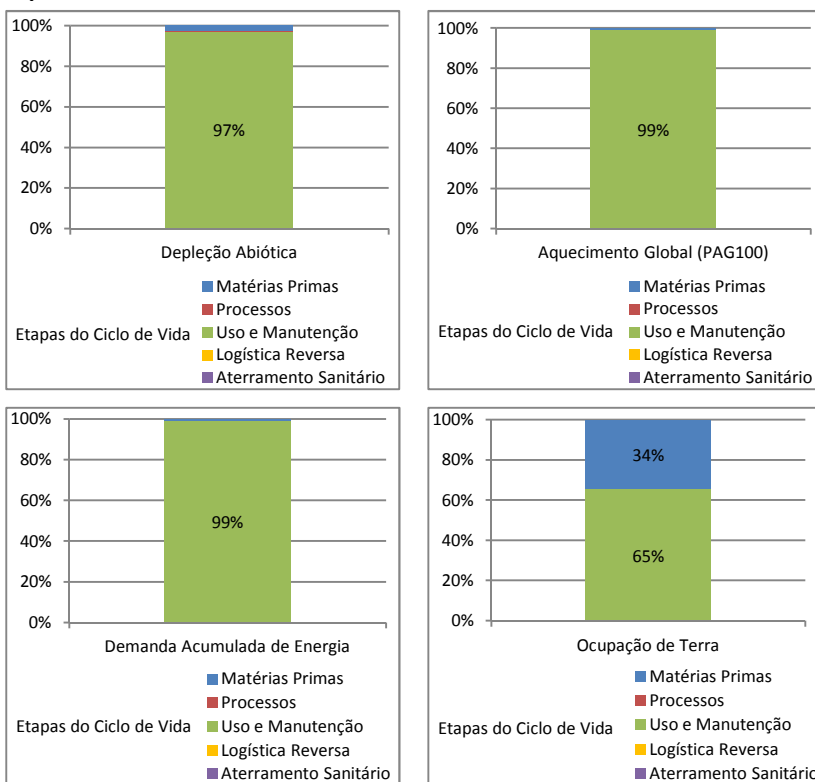
Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² ·a
Matérias Primas	9,06	929,68	21311,03	1734,21
Processos	2,02	239,48	5613,07	21,32
Uso / Manutenção	367,77	133774,78	2877820,38	3300,59
Logística Reversa	0,45	64,65	1061,81	0,94
Aterramento Sanitário	0,04	14,21	102,75	0,59
Total	379,35	1,35E+05	2,91E+06	5057,65

Conforme Tabela 20, e já antecipado pelos comentários do item 4.2.1. Análise Preliminar Geral, a etapa de uso e manutenção apresenta as maiores contribuições para todas as categorias de impacto ambiental avaliadas. Esta e as demais etapas do ciclo de vida estão demonstradas com relação às participações para o impacto ambiental final por categoria na Figura 29. Nesta figura, observa-se a grande predominância da etapa de uso e manutenção (cor verde) na geração dos impactos. A categoria de Ocupação de Terra apresentou uma distribuição da demanda por área mais perceptível entre as etapas do ciclo de vida, com

34% atribuída à etapa de aquisição das matérias-primas (fração azul da coluna).

Nos gráficos da Figura 29, o pós-uso, como o somatório das gerações de impacto por parte da logística reversa (fração laranja) e do aterramento sanitário (fração roxa), detém pouca participação na geração de impactos ambientais quando comparado ao ciclo de vida completo do compressor, com 0,13% para a Depleção Abiótica, 0,06% das emissões do Aquecimento Global, 0,04% para a categoria de Demanda Total Acumulada de Energia e 0,03% da necessidade de Ocupação de Terra.

Figura 29. Contribuição de cada etapa do ciclo de vida por categorias de impacto ambiental.



Com a retirada da fase de uso e manutenção os valores totais decaíram consideravelmente conforme linha 'Total' da Tabela 21.

Tabela 21. Impactos gerados segundo etapas do ciclo de vida do produto, exceto fase de Uso e Manutenção.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Matérias Primas	9,06	929,68	21311,03	1734,21
Processos	2,02	239,48	5613,07	21,32
Uso / Manutenção	-	-	-	-
Logística Reversa	0,45	64,65	1061,81	0,94
Aterramento Sanitário	0,04	14,21	102,75	0,59
Total	11,58	1248,03	28088,66	1757,06

A etapa dominante na geração de impactos passa a ser a Aquisição de Matérias-Primas, com 78%, 74%, 76% e 99% para as categorias de impacto analisadas, seguida pela etapa de manufatura do compressor de ar, de acordo com os valores apresentados na linha ‘Processos’ da Tabela 21.

Para a Depleção de recursos abióticos os gargalos do sistema de produto dentro da aquisição das matérias-primas foram o componente ‘reservatório de ar’ e o componente ‘motor’, consumidos três vezes cada para o período de 30 anos e representam os maiores subconjuntos em massa de matérias-primas metálicas do compressor. Os processos de manufatura e seus consumos representam aproximadamente 17% de contribuição para esta categoria de impacto, em virtude das matérias-primas envolvidas nos processos elementares, em específico, os processos de manufatura do reservatório, que conforme Zanghelini (2010) são realizados inteiramente dentro da empresa após a chegada da bobina de chapas de aço baixo carbono. A logística reversa representou aproximadamente 4% do consumo dos 11,58 kg de Sb eq. enquanto que a disposição em aterro praticamente não é representativa, contribuindo com 0,4% dos impactos desta categoria.

Os mesmos subconjuntos (reservatório e motor) têm a maior contribuição da liberação de GEE para a categoria de Aquecimento Global. Estes subconjuntos são os maiores emissores por possuírem maiores massas metálicas envolvidas na sua estrutura e por conseguinte, no seu beneficiamento (extração e fundição) consumirem maiores quantidades de eletricidade, gás natural e carvão. Na manufatura os principais gargalos foram os processos de fabricação do reservatório (secagem principalmente) e agora surgindo também o processo de manufatura do cilindro em detrimento ao alto consumo energético na usinagem. A logística reversa, pela emissão de gases durante a queima de combustíveis fósseis acaba por contribuir com pouco mais de 5%

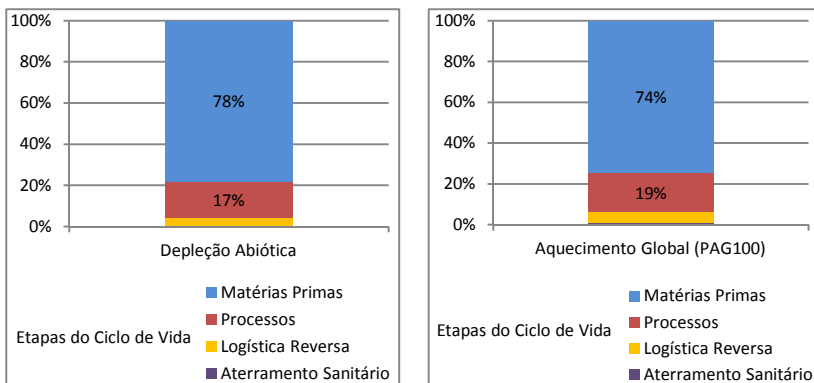
enquanto que o aterramento do compressor durante o período estipulado de 30 anos emite 1,16% das emissões sem considerar a fase de uso e manutenção do equipamento.

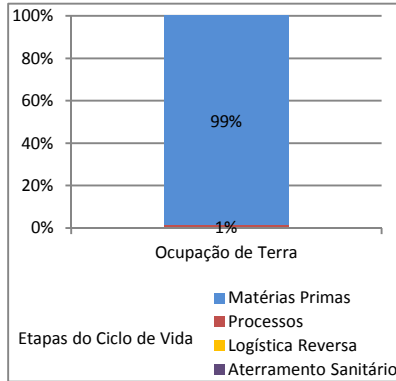
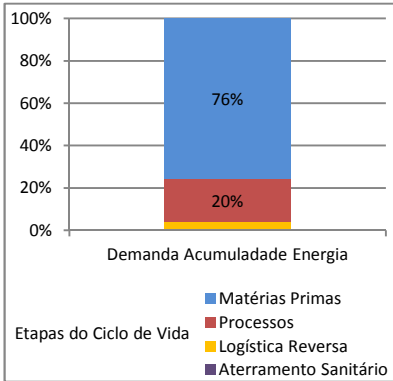
Com relação às necessidades energéticas, a aquisição de matérias-primas apresenta o reservatório, o motor e também a madeira que é concebida na forma de estrado e embalagem para o compressor pronto (envio ao consumidor). A manufatura do equipamento representa a segunda maior necessidade energética, em torno de 20%, pelos processos de fabricação do reservatório e do cilindro.

A ocupação terrestre está ligada principalmente ao emprego de elementos ou componentes de madeira durante o ciclo de vida do sistema de produto. São gargalos para esta categoria de impacto pelo fato de requererem área plantada, contabilizando normalmente parcelas de ocupação e de transformação de áreas nativas. Desta maneira cita-se a aquisição de matérias-primas associadas a etapa de montagem final, momento em que é ‘consumido’ a embalagem de madeira do produto pronto e o processo de descarga do reservatório, momento em que o estrado de madeira, base para o cilindro de ar, é atrelado ao mesmo após a pintura.

As participações de cada etapa, a exceção do uso e manutenção, estão na apresentados na Figura 30.

Figura 30. Contribuição de cada etapa do ciclo de vida por categorias de impacto, sem a etapa de uso e manutenção.





4.2.4. Cenário RC

O Cenário RC mantém o mesmo panorama do Cenário AS, com uma predominância completa na geração de impactos da etapa de uso e manutenção do compressor. Tanto é que as porcentagens de participação foram semelhantes: 97%, 99%, 99% e 65% para as categorias. A distribuição das participações para a categoria de Ocupação de Terra (categoria que apresenta-se dividida entre fase de uso e fase de aquisição de matérias-primas) foi de 34% da área atribuída às atividades de obtenção das matérias-primas do sistema de produto.

Os valores totais dos impactos ambientais para as categorias (com pós-uso RC) seguem apresentados na Tabela 22, onde valores negativos de geração de impacto na fase de reciclagem ('coluna RC') ocorrem devido à concepção de produto evitado como descrito em Pressupostos dentro de Metodologia. Significa um impacto positivo associado à esta etapa do ciclo de vida, em que o material reciclado preenche uma necessidade, antes existente, da produção deste material a partir de sua fonte primária. É portanto, um impacto evitado superior àqueles gerados pelos próprios processos de desmonte, reciclagem (refundição) e aterramento, além dos transportes das frações deste cenário.

Tabela 22. Impactos ambientais gerados segundo etapas do ciclo de vida.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Matérias Primas	9,06	929,68	21311,03	1734,21
Processos	2,02	239,48	5613,07	21,32
Uso / Manutenção	367,77	1,34E+05	2,88E+06	3300,59
Logística Reversa	0,45	64,65	1061,81	0,94
Reciclagem	-4,14	-461,40	-6754,46	-15,80
Total	375,17	134547,20	2,899 E+06	5041,27

Ao analisar o Cenário RC sem a fase de uso e manutenção, conforme Tabela 23, é possível divisar um pouco melhor as participações das etapas restantes do ciclo de vida do compressor para este cenário.

Tabela 23. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida exceto fase de Uso e Manutenção.

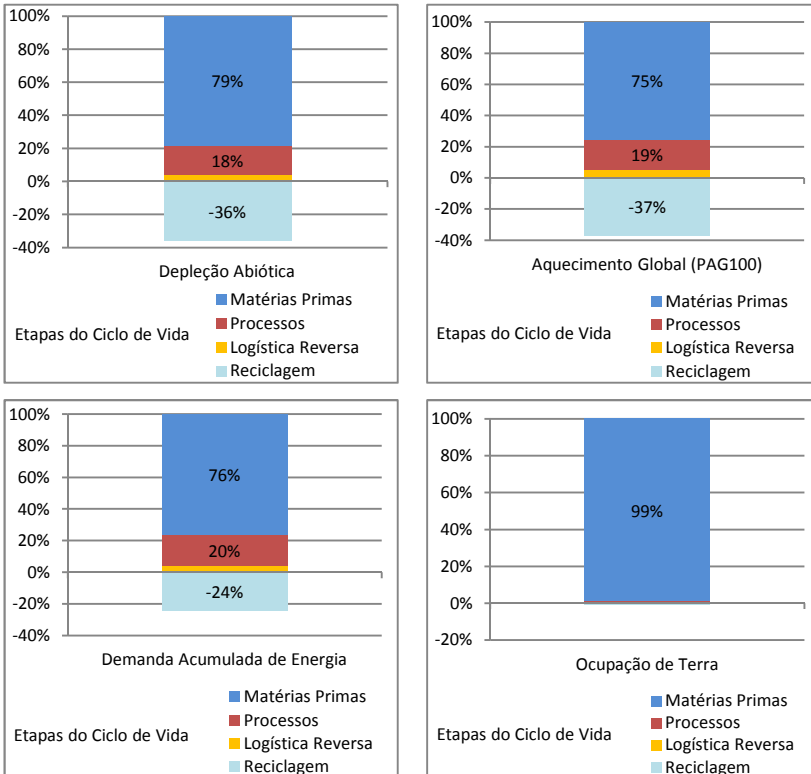
Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Matérias Primas	9,06	929,68	21311,03	1734,21
Processos	2,02	239,48	5613,07	21,32
Uso / Manutenção	-	-	-	-
Logística Reversa	0,45	64,65	1061,81	0,94
Reciclagem	-4,14	-461,40	-6754,46	-15,80
Total	7,40	772,42	21231,45	1740,68

Como já descrito para AS, na análise sem a fase de uso do compressor do Cenário RC, a geração de impactos negativos para as categorias selecionadas é dominada pela fase de aquisição de matérias-primas, 79% para Depleção Abiótica, 75% para Aquecimento Global, 76% para Demanda Total Acumulada de Energia e 99% para Ocupação terrestre. Seguidos pelos processos de manufatura com 18%, 19%, 20% e 1% para as mesmas categorias respectivamente. A logística reversa teve pouca participação na geração de impactos, como demonstrado na Figura 31.

As fatias em azul claro nos gráficos desta figura apresentam valor negativo, relativo ao impacto positivo do Cenário RC. Estes valores representam, na análise sem fase de uso e manutenção, o equivalente a 36% dos impactos negativos para a categoria de Depleção Abiótica, 37% dos impactos negativos para o Aquecimento Global, 24% de diminuição de consumo energético e ainda, 0,85% a menos de ocupação

terrestre. Por meio desta concepção o cenário de reciclagem é capaz de não gerar por exemplo, 461 kg de CO₂ equivalente para a categoria de aquecimento global ('coluna RC', Tabela 23).

Figura 31. Participação na geração de impactos ambientais das etapas do ciclo de vida do compressor (exceto a fase de uso e manutenção). Frações negativas representam impactos evitados, e portanto, impactos positivos.



A origem do impacto para a categoria de diminuição dos recursos abióticos, é advinda, assim como em AS, principalmente da aquisição de matérias-primas de subconjuntos como o reservatório de ar e o motor. Da manufatura, ressaltam-se os processos que envolvem a fabricação do reservatório de ar enquanto que o impacto positivo da reciclagem é oriundo principalmente do volume reciclado de aço em virtude da não necessidade de consumos de energia, gás natural, de carvão e do minério virgem na obtenção primária deste material.

Para a categoria de Aquecimento Global, a grande emissão advém dos consumos de aço do reservatório de ar e dos consumos do subconjunto motor durante a aquisição de matérias-primas. Na etapa de manufatura, os grandes gargalos estão nos processos de manufatura do reservatório, principalmente a secagem pelo consumo e queima de gás natural. A logística reversa em virtude da queima do óleo diesel dos caminhões apresentou uma participação de aproximadamente 5%. Para esta categoria de impacto, os valores 'evitados' tem origem principalmente no aço reciclado por evitar o consumo de carvão, gás natural e energia elétrica, bem como da não necessidade da extração de insumos virgens como o ferro-níquel, calcário, cobre entre outros.

Com relação à demanda acumulada de energia elétrica, os gargalos do sistema permaneceram os mesmos que os da categoria de impacto anterior, sendo os subconjuntos reservatório e motor na aquisição das M.P. e os processos do reservatório na manufatura. A Logística reversa representou um valor de participação próxima 5% do total sem a fase de uso e manutenção em detrimento ao consumo de combustível fóssil (principalmente). Os impactos positivos da reciclagem estão associados ao aço reciclado como grande contribuinte para a não necessidade do consumo energético antes existente na obtenção de fontes virgens deste material.

Quanto à ocupação de terras, é dominada pelo consumo de componentes de madeira pelos mesmos motivos abordados no Cenário AS. O pequeno impacto evitado é decorrente da não necessidade de jazidas de extração de minérios e demais insumos como o carvão quando na obtenção primária das frações recicladas.

O pós-uso, especificamente o somatório dos impactos da logística reversa e do pós-uso, geram impactos evitados, o que significa que os impactos positivos associados aos produtos evitados suplantam os impactos negativos dos processos de logística, desmonte, reciclagem e aterramento das frações não recicláveis.

4.2.5. Cenário RM

Assim como nos Cenários AS e RC, a etapa dominante na geração de impactos para as categorias analisadas foi o uso e manutenção do equipamento. A categoria de Ocupação de Terra, assim como AS e RC apresentou certa divisão dos impactos. Além dos 73% atribuídos à fase de uso e manutenção, demonstrou uma necessidade de 25,7% do total da área ocupada para a fase de aquisição de matérias-primas.

A geração de impactos para o ciclo de vida com pós-uso em Cenário RM estão descritos na Tabela 24. Os valores negativos da linha 'Reciclagem' significam o impacto positivo da produção evitada do material reciclado, suplantando os impactos negativos dos próprios processos de reciclagem.

Tabela 24. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida do produto.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Matérias Primas	6,04	619,79	14207,3	1156,14
Processos	1,35	159,66	3742,05	14,22
Uso / Manutenção	367,77	1,34E+05	2,88E+06	3300,59
Logística Reversa	0,60	86,21	1415,74	1,26
Remanufatura	1,04	113,08	3016,64	30,37
Reciclagem	-2,76	-307,60	-4502,98	-10,53
Total	374,05	1,34E+05	2,90E+06	4492,04

Mais uma vez, realizou-se a análise do Cenário com a retirada da fase dominante em impactos ambientais. Como consequência, as etapas de obtenção das matérias-primas, manufatura e, aparecendo para este cenário, a remanufatura, predominam na contribuição dos impactos, conforme Tabela 25.

Tabela 25. Impactos ambientais segundo etapas do ciclo de vida do produto, exceto Uso e Manutenção.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Matérias Primas	6,04	619,79	14207,3	1156,14
Processos	1,35	159,66	3742,05	14,22
Uso / Manutenção	-	-	-	-
Logística Reversa	0,60	86,21	1415,74	1,26
Remanufatura	1,04	113,08	3016,64	30,37
Reciclagem	-2,76	-307,60	-4502,98	-10,53
Total	6,28	671,13	17878,82	1191,45

Comparando com os Cenários AS e RC, a grande diferença das participações nos impactos está na fase de remanufatura que figura entre aquelas de considerável impacto ambiental para três das quatro categorias de impacto analisadas.

A etapa que contabiliza os impactos da retirada e beneficiamento primário da matéria-prima virgem (Figura 32) apresentou participações na ordem de 67% para a diminuição dos recursos abióticos, 63% para as

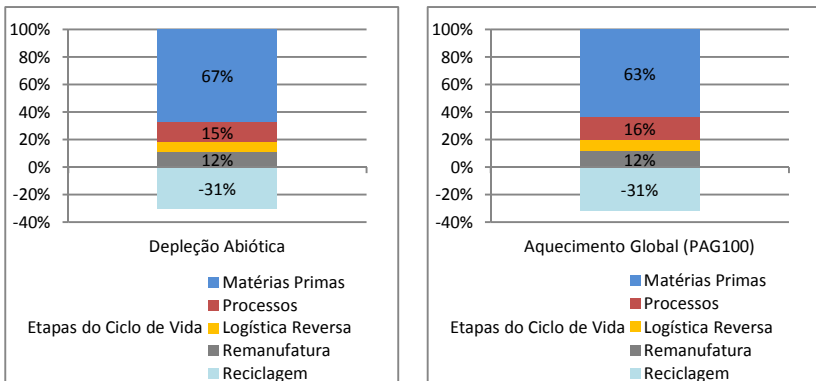
emissões de gases do efeito estufa, 63% da necessidade energética do sistema de produto e ainda 96% da área ocupada. Enquanto nos processos de manufatura, seus consumos e gerações requerem 15% dos recursos abióticos, emitiram 16% para a categoria de Aquecimento Global, necessitam de 17% do consumo energético e 1,18% da ocupação de terras.

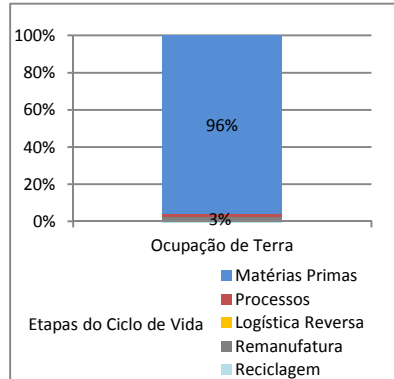
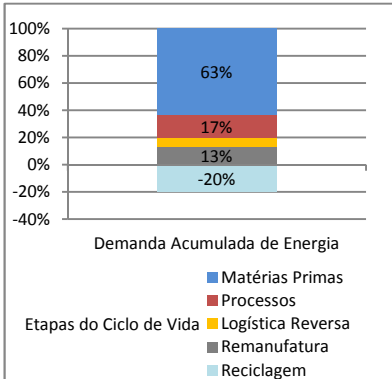
A participação da logística reversa para o Cenário RM é um pouco mais perceptível que nos Cenários AS e RC, uma vez que é aplicada mais vezes para o compressor remanufaturado.

Os processos necessários para efetuar a remanufatura do compressor obsoleto apresentam significativas gerações de impacto, aproximando-se às participações da própria manufatura. São 12%, 12%, 13% e 3% para as categorias. Embora as peças não aproveitadas e recicladas gerem impactos positivos (da concepção de produto evitado), não é o suficiente para que ultrapasse a geração de impactos negativos, e portanto, apenas atenua os valores negativos e as participações percentuais para as categorias.

A reciclagem final apresentou valores negativos que correspondem aos impactos positivos decorrentes dos produtos evitados.

Figura 32. Contribuição das etapas do ciclo de vida do compressor por categorias de impacto (exceto a fase de uso e manutenção do compressor). Frações negativas representam impactos evitados.





Ao somarmos as três etapas da gestão final do equipamento (logística reversa, remanufatura e reciclagem), têm-se impactos positivos de 12% para consumo abiótico e 11% para o Aquecimento Global, e ainda 0,32% de consumo energético evitado. Enquanto que para a categoria de Ocupação Terrestre, apesar de atenuado, o impacto permanece negativo totalizando 1,8% do total ou 21,09 m²·a.

Os gargalos do sistema de produto de acordo com a Depleção Abiótica na etapa de aquisição de matérias-primas foram decorrentes principalmente do consumo de chapas de aço do componente reservatório (43% do total gerado) e das matérias-primas do motor (15%). Com relação aos processos de manufatura o reservatório demonstrou-se como o gargalo por meio dos seus processos, que acontecem inteiramente dentro da linha de produção. A logística reversa apresentou valor cuja fonte principal reside no consumo do óleo diesel, derivado do óleo cru.

Na sequência, os processos de remanufatura são responsáveis por 12% do total consumido pelo Cenário RM. Esta etapa é atenuada pelos 'produtos evitados' dos componentes que não são reutilizados (por motivos de segurança e pelo desgaste durante os 10 anos de uso) e que seguem para a reciclagem. Este fator acaba por diminuir em aproximadamente 44% do consumo de matérias-primas (Tabela 25). Dos impactos ambientais para esta etapa, os gargalos se localizam nas peças repostas (consumo das mesmas), incidindo principalmente sobre o reservatório e o cilindro com 70% e 12% para estes componentes respectivamente.

Por fim, a aplicação da reciclagem para o compressor em fim de vida (após reúso), em um balanço de processos e frações recicladas, evita 2,76 kg de Sb. equivalente em virtude principalmente do aço

reciclado não ser mais retirado da natureza pela concepção de produto evitado.

Analisando as origens dos impactos ambientais para a categoria de Aquecimento Global, a etapa de maior emissão (aquisição das matérias-primas) apresentou como grande gerador de impacto o consumo de materiais do reservatório com 47% do total para esta etapa, dominado pelas chapas de aço. O consumo de materiais do motor é outro gargalo, dominado pela carcaça de ferro fundido, emitindo 18,5% dos 619,79 kg de CO₂ eq. Dos processos de manufatura, têm-se como origem da emissões dos GEE, os processos de fabricação do reservatório com o equivalente a 63% do total emitido por esta etapa do ciclo de vida do compressor. Outro processo é a usinagem do cilindro, que pelo elevado consumo de energia elétrica corresponde com 19%.

A etapa de logística reversa possui, assim como nos demais cenários, no uso dos veículos em função das emissões durante a combustão do óleo diesel sua fonte de impacto para a categoria de Aquecimento Global.

Durante a etapa de remanufatura os *hotspots* foram semelhantes à categoria de depleção abiótica, envolvendo impactos evitados das frações recicladas dos componentes (Tabela 16) e, impactos negativos relativos às peças repostas (em específico o reservatório com 71,3% das emissões, o cilindro com 11%, e o pistão com 5,4%). O ‘produto evitado’ atenua as emissões na remanufatura em 45% (componentes não reaproveitáveis e que seguem para a reciclagem).

A reciclagem final correspondeu com impactos positivos no montante de 308 kg de CO₂ eq. evitados principalmente pela reciclagem do aço, sendo que alguns processos de reciclagem (do aço e do ferro, no caso a refundição) produzem consideráveis emissões, porém sem ultrapassar o impacto positivo dos produtos evitados.

Com relação a Demanda Acumulada de Energia os gargalos do sistema e os geradores de impactos positivos (produtos evitados) foram semelhantes às demais categorias de impacto para este cenário. Na aquisição de M.P., além dos subconjuntos reservatório e motor, surge a aquisição da madeira como embalagem e base, sendo responsável por 16% da demanda energética desta etapa do ciclo de vida. A manufatura do reservatório e do cilindro permanecem como *hotspots* na fase de manufatura do compressor e a fabricação do combustível para uso na logística reversa. As etapas de Remanufatura e Reciclagem apresentaram o mesmo panorama em demanda energética que em

emissões de GEE, tanto para impactos negativos quanto para positivos (produtos evitados).

Por fim, a categoria de Ocupação de Terra foi por inteira dominada pela aquisição da matéria-prima madeira, utilizada como base e embalagem do compressor.

4.2.6. Comparação dos Cenários

O confronto comparativo dos resultados dos Cenários demonstrou que o RM detém melhor desempenho ambiental que os Cenários AS e RC, sendo ainda o Cenário RC preferível ao AS. Como mencionado nos itens anteriores, o grande consumo energético durante a fase de uso e manutenção foi o grande gerador de impacto para todas as categorias analisadas. Os impactos totais gerados por cada compressor, segundo especificações de cada Cenário bem como pressupostos já descritos nesta dissertação estão compilados na Tabela 26.

Para a categoria de Depleção Abiótica, os Cenários RM e RC apresentaram pequenas variações comparados ao AS, com pouco mais de 1,4% e 1,1% de redução de impacto respectivamente. Com relação à categoria de Aquecimento Global, as diferenças ou melhorias são menos visíveis. O Cenário AS apresentou o pior desempenho ambiental, embora muito semelhante aos demais. Entre o Cenário AS e os Cenários RM e RC a diminuição das emissões apresentou-se na faixa de 0,4%. Do consumo energético, as variações foram de 0,35% e 0,24% para a mesma análise comparativa entre o Cenário AS e os Cenários RM e RC. A quarta e última categoria de impacto analisada apresentou o mesmo padrão com o posicionamento do AS como pior cenário, enquanto que o RM demonstrou os menores impactos. Em relação à Ocupação de Terra, ocorreu uma diminuição de 0,32% entre os Cenários AS e RC, e de 11,18% entre os Cenários AS e RM.

Tabela 26. Geração de impacto ambiental para os Cenários.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² .a
Cenário AS	379,35	135022,81	2905909,04	5057,65
Cenário RC	375,17	134547,20	2899051,83	5041,27
Cenário RM	374,05	134445,91	2895699,20	4492,04

Os valores atribuídos a cada cenário sem incluir a fase de uso e manutenção seguem na Tabela 27.

Tabela 27. Geração de impacto ambiental para os Cenários, sem a fase de Uso e Manutenção.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² ·a
Cenário AS	11,58	1248,03	28088,66	1757,06
Cenário RC	7,40	772,42	21231,45	1740,68
Cenário RM	6,28	671,13	17878,82	1191,45

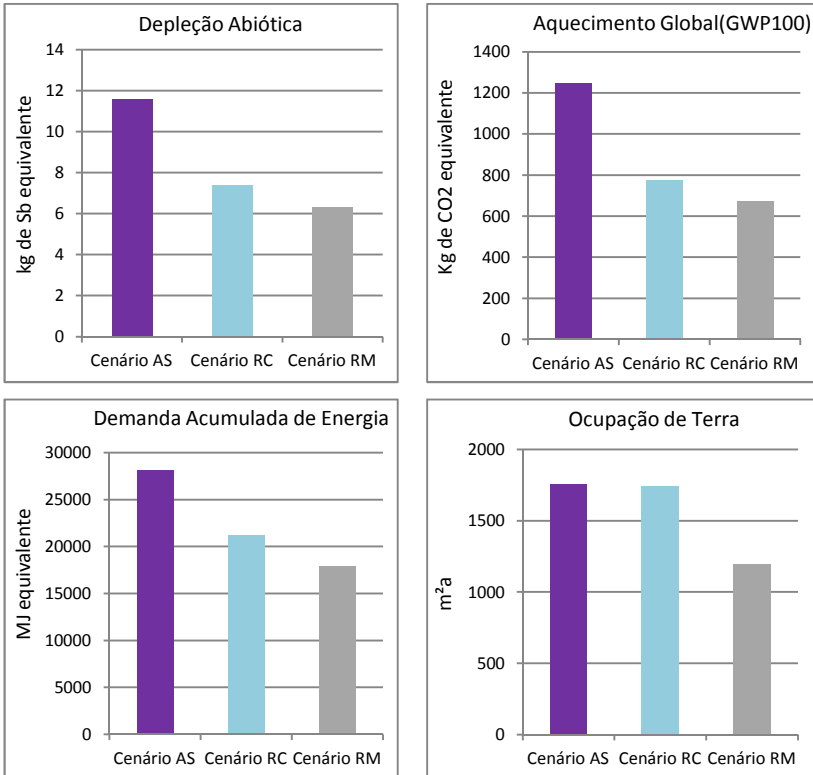
Para a categoria de impacto de Depleção Abiótica a variação no desempenho ambiental passou a ser de 45,8% entre os Cenários RM e AS e de 36,1% entre RC e AS, sendo o Cenário AS aquele de pior desempenho. Já as reduções para a categoria de Aquecimento Global entre o Cenário AS e os Cenários RC e RM passaram a ser de 38,1% e 46,22%, respectivamente. Com relação ao consumo energético, o Cenário RC consumiu 6857,21 MJ a menos que o Cenário AS, o que significa uma redução percentual de aproximadamente 24,5%. Comparado ao Cenário RM, o AS apresenta um consumo 36% superior.

Estes valores estão em conformidade com a afirmação de Björklund e Finnveden (2005), que apontaram que a reciclagem de materiais não renováveis (como os metais) possui desempenho ambiental preferível à incineração e ao aterramento, tanto em relação ao Aquecimento Global quanto à Demanda Acumula de Energia. Os mesmos autores complementam que normalmente os impactos evitados (pelos produtos reciclados) são significativos o suficiente para motivar a reciclagem.

Por último, a ocupação de terra apresentou valores muito semelhantes para os dois primeiros Cenários, permanecendo o posicionamento do RC a frente do AS em melhor desempenho ambiental. O RM é o Cenário que destoa, apresentando cerca de 32% de redução em relação à AS.

O posicionamento dos cenários, conforme desempenho ambiental por categoria de impacto, pode ser melhor visualizados na forma de gráficos apresentados na Figura 33, exceção à fase de uso e manutenção dos compressores.

Figura 33. Geração de impactos ambientais para os três cenários analisados, sem a fase de uso e manutenção.



Este posicionamento atende as exigências do órgão ambiental americano (USEPA, 2000) e da diretriz Europeia para REEE, que impõe a prioridade para a reutilização ou reúso dos equipamentos, subconjunto e consumíveis sempre que possível. Quando não for possível, opta-se pela valorização por meio da reciclagem e da recuperação, dando ao produtor incentivos para o uso de componentes reciclados junto com novos componentes (UNIÃO EUROPÉIA, 2003). Segundo esta diretriz, o reúso e a recuperação dos REEE são opções ambientais melhores. Esta afirmação e o resultado comparativo desta dissertação estão alinhados com afirmações dos autores Lindahl, Sundin e Östlin (2006) que posicionam as opções ambientalmente preferíveis em: 1) redução do uso de materiais; 2) reúso de componentes e a recauchutagem; 3) Remanufatura; 4) reciclagem dos materiais; 5) incineração com recuperação de energia e; 6) aterramento.

Com relação às variações no desempenho entre os três Cenários, estas ocorrem principalmente em virtude da diferença em consumo das matérias-primas virgens (peças e componentes), e da concepção de impacto evitado quando na reciclagem dos materiais.

O cenário RC passa a ser o preferível à AS a partir do momento em que a concepção de produto evitado é considerado. Anteriormente, no RC apenas acrescenta impactos ambientais ao seu desempenho, pelos processos, consumo e gerações intermediários. O encaminhamento de REEE para aterros sanitários não acrescenta quaisquer impactos positivos, tanto ambientais quanto econômicos, como concluíram Dowdell *et al.* (2000). Enquanto que o motivo para que o Cenário RM seja ambientalmente preferível à RC e à AS, segundo as categorias analisadas, reside no fato de o mesmo necessitar de menos matéria-prima virgem para preencher a unidade funcional proposta, somados os dois compressores novos e as peças repostas para ambos na remanufatura; na menor necessidade de processos de manufatura; e no montante de frações recicladas consideradas como produto evitado (tanto nas peças não reaproveitáveis quanto na reciclagem do compressor esgotado). De modo que, o acréscimo de impacto ambiental gerado pelos processos de remanufatura e logística reversa foram inferiores aos ganhos positivos deste cenário.

A Remanufatura como Cenário de pós-uso também obteve melhor desempenho ambiental em pesquisas realizadas por Biswas e Rosano (2011), comparando-se com à fabricação de um compressor novo. Apesar das características do compressor analisado e do escopo da ACV destes autores diferirem deste presente estudo em sistema de produto analisado, em fronteiras do sistema (não considera fases de uso e disposição final) e quantidade de peças repostas, os autores alcançaram diminuições de até 90% para as emissões de CO₂ equivalente, entre um compressor novo e um remanufaturado. Smith e Keoleian (2004) comparam motores de ignição (novo e remanufaturado) e, embora também não envolveram o uso e a disposição final dos mesmos no escopo do estudo, concluem que os remanufaturados geram menores impactos. Conforme os pesquisadores Dowdell *et al.* (2000) a remanufatura é preferível à reciclagem e que o aterramento de 100% de equipamentos eletroeletrônicos (estudo baseado nos sistemas de produto: televisão, máquina de lavar, aspirador, cortador de grama, telefone, computador e geladeira) se destaca como pior cenário em uma análise de custos e ambiental. Kerr e Ryan (2001), Lindahl, Sundin e Östlin (2006) obtiveram conclusões semelhantes.

4.2.7. Análise de Sensibilidade (Variação das Fronteiras)

O primeiro posicionamento da fronteira compreendeu apenas a etapa de fim de vida do compressor (Figura 22, página 71). São os impactos causados pela logística reversa somados à destinação que cada um dos cenários propõe, sem etapas como a aquisição das matérias-primas, manufatura e uso/manutenção. A concepção de produto evitado (dos Cenários RC e RM) foi entendida como pertencendo à etapa de aquisição de matérias-primas, e portanto, não contabilizadas nesta primeira delimitação.

Com este posicionamento o Cenário de pior desempenho ambiental foi aquele que propôs a reciclagem como pós-uso, seguido por aquele que aplica a remanufatura, e por fim o aterramento, que obteve o melhor desempenho (Tabela 28), ocorrendo uma inversão dos Cenários de melhor desempenho se comparado ao ciclo de vida total (apresentado no item anterior).

Tabela 28. Impactos ambientais conforme 1ª fronteira (somente a etapa de pós-uso).

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² ·a
Cenário AS	0,50	78,87	1164,56	1,53
Cenário RC	2,30	294,58	4481,13	11,05
Cenário RM	2,05	261,68	4181,32	9,02

De fato, os Cenários RC e RM apresentaram valores muito próximos e muito superiores ao AS. Esta disparidade é atribuída à consumos e gerações dos processos de desmontagem e remontagem (energia elétrica e ar comprimido), remanufatura (insumos como água e cola por exemplo e gerações como efluente) e dos consumos dos processos de reciclagem (energia na refundição principalmente). Além disso, os transportes para ambos Cenários (RC e RM) são mais complexos, existindo maiores distâncias envolvidas após a chegada do compressor obsoleto na empresa e encaminhamento das frações. Enquanto isso, o AS apresenta apenas uma destinação curta até o aterro sanitário e nenhum processo intermediário (nenhum consumo ou geração), apenas a contabilização das suas frações no aterro sanitário.

Para a categoria de Depleção abiótica, o Cenário AS apresentou como origens a logística reversa (90%) e o aterramento que contribui com os outros 10%. O Cenário RC e o Cenário RM apresentam consumos muito superiores. O primeiro em detrimento aos consumos da logística reversa (20%) e do processo de refundição (60%). O segundo

possui os impactos divididos entre a logística reversa, com 29,5% do total, processos de remanufatura (10,3%) e refundição (44%).

A segunda categoria de impacto apresenta a mesma sequência de desempenho dos cenários. Para AS o impacto é gerado quase que exclusivamente pela logística reversa em virtude da queima de combustível fóssil (82%) no uso das carretas, com uma pequena participação associada à disposição de peças oleadas no aterro sanitário. Para o Cenário RM, a combinação de logística reversa, remanufatura e a reciclagem e todos os transportes intermediários das frações emitiu aproximadamente 2,3 vezes a mais que AS. Esta diferença foi advinda principalmente dos processos de reciclagem (59%) e da logística reversa que em RM é mais complexa, emitindo 33% do total (pouco mais de 20 kg de diferença entre a logística do Cenário AS). Por fim, o Cenário RC emitiu um valor 2,7 vezes superior à emissão do AS. A origem das emissões foi dominada pelos processos de reciclagem enquanto que a logística reversa apresentou emissões semelhantes ao Cenário AS, em virtude da queima de combustível fóssil que representou 22% do total emitido para RC com este posicionamento de fronteiras. Os processos de reciclagem contribuíram com 78% e diferiram do RM pelo montante em massa reciclada e requisitos energéticos para garantir principalmente a refundição.

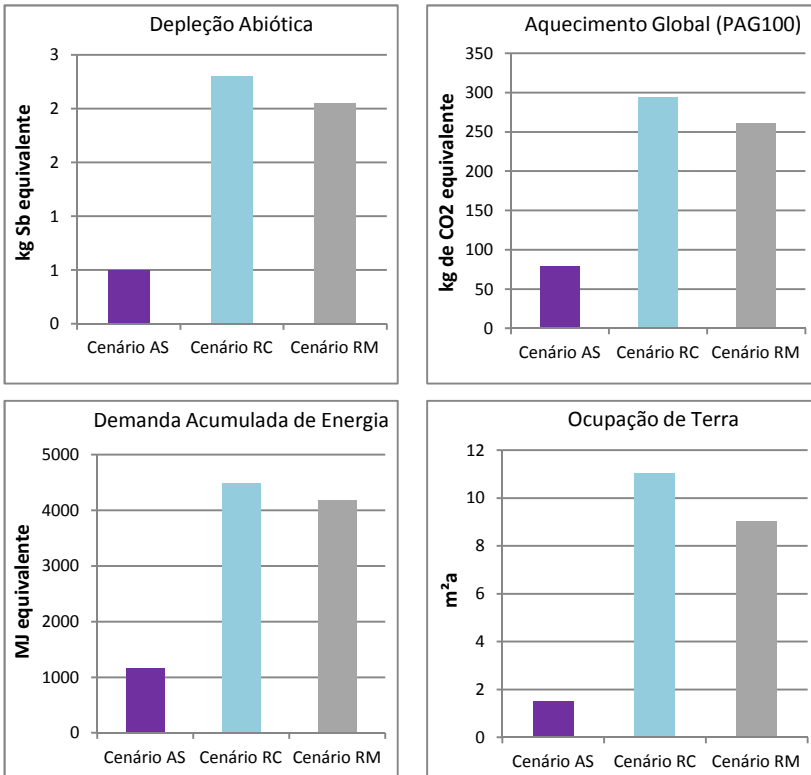
Com relação às necessidades energéticas dos ciclos de vida dos equipamentos, o Cenário RC apresentou maior consumo, seguido pelo RM e por fim o AS. Estes valores representaram uma redução de 6,7% entre os Cenários RC e RM enquanto que o consumo diminuiu 74% entre RC e AS. O Cenário RC apresentou duas fontes principais de consumo energético, a logística reversa e os processos de reciclagem. Enquanto a logística reversa requer quase 24% em virtude do uso e obtenção do combustível, os processos de reciclagem demandaram o restante, encabeçado pela refundição, com 69% do total dos MJ eq. Para o Cenário RM os pontos de concentração foram os mesmos do Cenário RC (logística 34% e processos de reciclagem 54,5%) acrescidos do processo de remanufatura, que apresentaram demanda de 11,5%. No Cenário AS o grande consumo energético se faz apenas pelo uso de combustível no processo de logística reversa (92% da demanda energética).

Para a categoria de Ocupação de Terra, o Cenário AS ocupou uma área de 1,5 m²-a, o RM precisaria de 9 m²-a e o RC de 11 m²-a, ocorrendo uma variação de 86% entre o maior e o menor. O Cenário RC necessitou de maior área ano porque recicla maior massa de

componentes, necessitando mais matriz energética. Apenas a refundição requer aproximadamente 65% do total. O restante foi associado a logística reversa (pelo consumo de combustível). A ocupação terrestre do Cenário RM ocorreu em três frentes principais: a logística reversa com 14%, o processo de remanufatura 11,3% e a reciclagem 74,7% da área ocupada ano. Nesta análise de sensibilidade o Cenário AS apresentou uma divisão da necessidade de ocupação, cabendo ao aterramento, 38% dos m²-a ocupados, enquanto que a logística reversa (em virtude da ocupação e manutenção das rodovias) necessitou do restante.

As variações para cada categoria de impacto segundo esta primeira delimitação podem ser melhor entendidos na Figura 34.

Figura 34. Impactos gerados pelos cenários conforme 1ª variação da posição da fronteira do sistema.



O segundo posicionamento da fronteira compreendeu as etapas de fim de vida do compressor e aquisição de matérias-primas (Figura 23, página 72). Aqui, foram contabilizados a logística reversa, destinações finais e transportes intermediários (incluindo a concepção de produtos evitados) e também a aquisição e manufatura das matérias-primas necessárias para fabricar um novo compressor. Além das diferenças dentre os pós-usos dos cenários propostos, cada qual possui influências na etapa de aquisição de matérias-primas, seja por condição de produto evitado (na reciclagem de materiais) ou pela necessidade (ou não) de se fabricar o compressor a partir de matérias-primas virgens. Ou seja, em 30 anos são três compressores novos para os Cenários AS e RC, enquanto que para o Cenário RM são apenas dois, portanto a contabilização de consumo de matérias-primas é diferente entre os cenários. As gerações de impacto para as categorias analisadas, segundo este posicionamento das fronteiras seguem na Tabela 29, e estão visualmente representadas pelos gráficos da Figura 35.

Tabela 29. Valores totais dos cenários conforme 2ª fronteira.

Categoria de Impacto	Depleção Abiótica	Aq. Global	D.T.A. Energia	Ocupação de Terra
Unidade	kg Sb eq	kg CO ₂ eq	MJ eq	m ² a
Cenário AS	9,56	1008,55	22475,59	1735,74
Cenário RC	5,38	532,94	15618,38	1719,35
Cenário RM	4,93	511,47	14136,77	1177,23

O Cenário AS passou a demonstrar o pior desempenho ambiental, invertendo a posição para esta colocação da fronteira do sistema em comparação ao primeiro posicionamento. Permanecendo o Cenário RM preferível ao RC, sendo a remanufatura o cenário de melhor desempenho ambiental. Descrevendo de uma maneira mais ampla, a inclusão da etapa de aquisição de matérias-primas acrescenta impacto sob as quatro categorias analisadas (etapa evidenciada como de maior geração de impacto na análise dos cenários na ausência da etapa de uso e manutenção, conforme demonstrado nos itens 4.2.3; 4.2.4. e 4.2.5.).

O Cenário AS apresentou um valor aproximadamente 48% superior ao RM, aumentando consideravelmente o consumo abiótico com o acréscimo da etapa de aquisição de matérias-primas. Se comparados aos resultados da fronteira anterior, o Cenário AS passa a consumir 9 kg a mais de antimônio equivalente. Os outros dois cenários passam a consumir consideravelmente para esta categoria, mas em virtude da concepção de produto evitado, o montante final em indicador da categoria foi um acréscimo de aproximadamente 3,0 kg para ambos.

O consumo dos recursos abióticos para o AS é advindo da própria aquisição das matérias-primas, com 95%, enquanto que as demais fontes foram da logística reversa pelo consumo de combustível (4,5%) e o aterramento (0,46%), valores já compilados na primeira delimitação da fronteira. Os resultados do Cenário RC quanto à origem do consumo abiótico foram próximos ao AS, com 9,06 kg para aquisição de matérias-primas e 0,45 kg para a logística reversa. A diminuição do consumo para esta categoria foi oriunda dos produtos reciclados, que contabilizaram impactos evitados tornando o somatório de consumos 4,14 kg menor. A remanufatura torna-se preferível a partir do momento em que a diminuição no consumo de matérias-primas virgens (quando comparado aos consumos do RC e do AS em virtude do menor número de compressores novos em 30 anos) associadas aos produtos evitados da reciclagem suplantam os impactos de consumo abiótico acrescidos pela logística reversa e pelos processos de remanufatura. Assim, a aquisição de M.P. consumiu 3,02 kg a menos que RC e AS embora a logística tenha apresentado um valor 33% superior aos demais. Os processos de remanufatura consumiram 1,04 kg tendo as frações recicladas, evitado 2,76 kg, perfazendo ao todo 4,93 kg de Sb. eq. consumo inferior ao RC.

A categoria de impacto de Aquecimento Global indicou o Cenário AS como aquele de pior desempenho se comparado aos Cenários RC e RM. Representou um valor aproximadamente duas vezes superior aos demais. AS apresenta como fontes de impacto a aquisição da M.P. (92,2%), logística reversa (6,4%) e aterramento (1,4%). Em relação ao Cenário RC, assim como descrito para a categoria anterior, os impactos negativos de emissões são semelhantes ao AS, cabendo a diminuição final entre os cenários ao impacto evitado das frações recicladas (representaram -461 kg de CO₂ eq.). RM apresentou o melhor desempenho para esta categoria porque acaba por emitir menos GEE na etapa de aquisição das matérias primas virgens (apenas dois compressores novos em 30 anos emitindo, apesar de emitir mais pela logística reversa e processos de remanufatura. Ainda possui o efetivo de impacto evitado de 308 kg de CO₂ eq. em detrimento às frações recicladas.

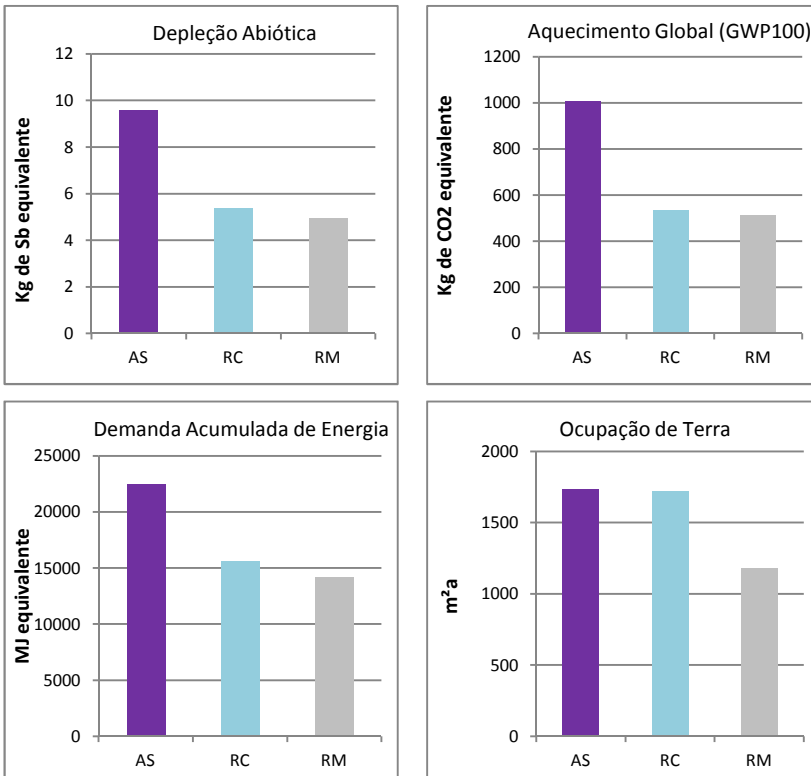
Descrevendo os resultados para a categoria de consumo energético acumulado, mais uma vez o Cenário AS tornou-se o de pior desempenho, com um consumo no mínimo 30% superior aos outros dois cenários, que possuem demandas energéticas relativamente próximas, sendo o Cenário RM o de melhor desempenho, com uma necessidade 5% inferior à demanda do Cenário RC. A origem da demanda energética

para o cenário de pior desempenho (AS) permanece a mesma que das categorias anteriores, inclusive se aproximando em participações (94,8% para a aquisição de M.P., 4,7% para a logística reversa e 0,45% para aterramento). A demanda energética de RC é semelhante ao AS diferindo pelo consumo evitado da produção primária dos materiais reciclados (aproximadamente 6700,00 MJ evitados). Enquanto que o Cenário RM apresentou a mesma divisão de impacto que na categoria anterior, dominada pela aquisição da M.P. porém inferior ao AS e ao RC, seguido da logística reversa e dos processos de remanufatura e diminuídos pela concepção de produto evitado.

Para as três categorias de impacto descritas e analisadas até o momento, de acordo com o segundo posicionamento da fronteira, o Cenário AS apresentou o pior desempenho, seguido do RC e do RM, com RC próximo a RM. Este panorama se modifica para a categoria de ocupação de terra. Para esta, o Cenário RC apresentou uma necessidade equivalente em área ocupada no ano que o AS, com uma pequena redução na ordem de 16 m²·a. Já o RM apresenta uma redução de 32%. A fonte da demanda por área para todos os três cenários foi principalmente o uso de madeira da embalagem e do pellet do compressor novo. Assim sendo o cenário que consome menos madeira, o RM, que dispõe no mercado dois compressores novos apresentou um terço a menos de m²·a, enquanto que os demais apenas diferem-se por área evitada pela reciclagem dos materiais e suas necessidades energéticas. Este resultado é condicionado ao fato de os compressores remanufaturados não serem reenviados com embalagens originais, o que pode ser modificado caso exista a necessidade de reenvia-los com a embalagem original. Caso os compressores remanufaturados utilizassem uma nova embalagem no reenvio idêntica de quando novos, o Cenário RM passaria a ser o de pior desempenho ambiental para a categoria de Ocupação de Terra, consumindo o dobro de área ano (aproximadamente 2300,00 m²·a). A madeira requer área ocupada durante a fase de crescimento das árvores, incluindo água e demais consumos.

A diferença para esta variação de fronteira de sistema fica evidente nos gráficos da Figura 35.

Figura 35. Impactos gerados pelos cenários conforme 2ª variação da posição da fronteira do sistema.



O terceiro posicionamento visualmente representado pela Figura 24 buscou envolver a totalidade do ciclo de vida do equipamento, com exceção da fase de uso e manutenção, apresentada nos pressupostos como comum aos três Cenários e gerador/concentrador de grande parte dos impactos ambientais. Portanto, este posicionamento pode ser entendido como aquele que envolve todas as etapas do ciclo de vida do compressor com potencial comparativo (etapas influenciadas pelas singularidades de cada Cenário). Este mesmo posicionamento foi utilizado no item 4.2.6.Comparação dos Cenários, com o intuito de evidenciar os valores de cada um e mesmo assim, manter a análise de maneira mais completa possível, como afirma Denison (1996), quando envolvida a reciclagem, deve-se considerar as mudanças na etapa de aquisição de matérias-primas e nos processos de manufatura devido ao uso de materiais reciclados ao invés de materiais virgens. Os resultados

foram compilados e estão apresentados na Tabela 27 e na Figura 33 dentro do item 4.2.6. Comparação dos Cenários na página 112.

De uma maneira geral, os valores para cada Cenário dentro de cada categoria de impacto sofreram um acréscimo, em detrimento aos processos de manufatura contemplados pelo novo posicionamento da fronteira. Por necessitar de menos processos de manufatura, o Cenário RM é aquele que demonstrou um menor valor acrescido que RC e AS, e portanto, torna-se ainda mais preferível em desempenho ambiental que os demais. O Cenário AS permaneceu como o de pior desempenho para as quatro categorias analisadas e ocorreu um maior distanciamento entre os valores dos Cenários RC e RM, já que a remanufatura compreende uma vez a menos os processos de fabricação do compressor durante o período estipulado pela unidade funcional.

Comparando com o Cenário RM, aquele de melhor desempenho em todas as categorias analisadas, o AS é acrescenta o equivalente a 46%, 46%, 36% e 32% de impactos negativos para as categorias de Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Demanda Total Acumulada de Energia e Ocupação de Terra respectivamente. Enquanto que o cenário intermediário, o RC, apresentou valores superiores ao RM em 15%, 13%, 16% e 31% e inferiores ao AS em 36%, 38%, 24% e 0,9% para as categorias enumeradas.

Denison (1996) compilou diversos estudos de ACV comparativas dentre Cenários de pós-uso para diferentes materiais, concluindo que, a reciclagem normalmente demonstra benefícios ambientais significantes quando analisados do ponto de vista correto. O mesmo autor explica que a escolha dentre os cenários de pós-uso gera questionamentos quando as fronteiras não incluem os impactos ambientais associados às atividades de manufatura dos materiais (como na primeira delimitação das fronteiras aplicada nesta dissertação). “Esta condição de contorno não fornecem um quadro completo dos impactos associados à reciclagem, aterramento ou incineração” (DENISON, 1996, p. 198), incluindo-se a remanufatura, uma vez que está estritamente ligada à reciclagem conforme o Cenário RM proposto nesta dissertação.

Esta afirmação é reforçada pela inversão de desempenho dentre os Cenários conforme posicionamento das fronteiras do sistema e demonstra o quanto a mesma (ou mesmas) pode(m) influenciar dentro do processo de tomada de decisão, e o quanto deve ser observada e respeitada durante a condução da ACV. A questão principal é o poder de influência e o alcance que o pós-uso exerce sobre as demais etapas do ciclo de vida, no que diz respeito ao quanto ela diminuirá em consumo

de matéria-prima virgem (na etapa de aquisição de matérias-primas dentro da ACV) e insumos da manufatura ou o quanto acrescentará em impactos ambientais por processos intermediários. O fato do pós-uso do compressor de ar nos Cenários RC e RM ter influenciado as demais etapas da ACV torna-se um ponto importante a ser considerado no posicionamento das fronteiras e na fase de interpretação dos resultados. Esta conclusão foi ressaltada por Denison (1996), que apontou que uma perspectiva limitada no que diz respeito às fronteiras do sistema, tem o potencial de distorcer as decisões em virtude da estreita interação entre as atividades que se localizam dentro e fora das fronteiras dos sistemas.

Desta maneira, é preferível um estudo do berço ao túmulo quando na análise de um melhor Cenário de pós-uso. Apesar do acréscimo de complexidade que um inventário do berço ao túmulo demanda, a interpretação dos resultados seria menos suscetível a erros ou a escolhas induzidas.

4.3. ANÁLISE CRÍTICA

A análise crítica é um dos itens opcionais, porém recomendado pelas normas de ACV (NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, 2009). Segundo as mesmas, trata-se de um processo para verificar se a ACV satisfaz os requisitos com relação à metodologia proposta, os dados coletados, interpretação e comunicação, e se, ao final, permanece consistente com os princípios elaborados no escopo (processo iterativo).

Assim, de acordo com objetivo e escopo desta ACV e com o desenvolvimento das etapas de ICV e AICV, foram identificados alguns pontos de maior interesse para a abordagem nesta análise crítica.

Com relação à metodologia proposta e aplicada nesta dissertação, em específico à escolha das categorias de impacto ambiental (Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Demanda Energética Total Acumulada e Ocupação de Terra), salienta-se que a opção pelas mesmas apoiou-se na Diretriz 2002/96/EC (UNIÃO EUROPÉIA, 2003) e no grau de interesse, comunicação e entendimento dos resultados. No entanto, existem diversas outras categorias, inclusive o próprio método utilizado (como demonstrado no item 4.2.1. Análise Preliminar Geral), que envolvem outros aspectos ambientais. Portanto, é de suma importância entender que os resultados obtidos por esta ACV estão relacionados somente às categorias analisadas, e que a escolha do melhor Cenário foi baseado nas mesmas. É possível que, ao analisar outras categorias a escolha do Cenário de melhor desempenho ambiental necessite ser reavaliado.

Ainda com relação aos resultados obtidos após a caracterização e a posterior análise dos mesmos, atribuiu-se o mesmo peso para as quatro categorias analisadas, de modo que todas possuíssem a mesma importância na análise. Para a escolha do cenário, caso fosse aplicado pesos às categorias de impacto, o Cenário RM permaneceria como o de melhor desempenho ambiental, seguido pelo RC e por fim o AS, uma vez que a etapa de Remanufatura apresentou os menores valores para todas as quatro categorias de impacto avaliadas, seguido da Reciclagem e Aterramento Sanitário.

Os pressupostos assumidos na metodologia são aplicados de maneira a viabilizar o fechamento do ciclo de vida do sistema de produto (berço ao túmulo). Sem os quais, a ACV se tornaria excessivamente complexa e requereria o envolvimento de ciclos de vida adjacentes ao compressor de ar, de modo a aumentar drasticamente os esforços envolvidos e a demanda de tempo e de recursos. Muitos dos pressupostos foram baseados em estimativas ou em Cenários adotados, principalmente nas etapas as quais a empresa não possui domínio, como o beneficiamento das matérias-primas e criação de parte dos Cenários de pós-uso. É importante que as partes envolvidas na ACV, quando analisarem um dado ou situação não advinda de fonte primária, tenham o discernimento de que é uma das situações existentes e possível de ocorrer, mas que pode não representar a situação sempre recorrente.

O primeiro pressuposto, de que maquinários intermediários não contribuem de maneira significativa na geração de impactos ambientais do sistema de produto analisado, dificilmente será quebrado, entendendo que equipamentos consolidados possuem vida útil longa e capacidade de beneficiar grandes quantidades de matérias-primas e/ou produtos no decorrer da mesma (com relação à unidade funcional).

O segundo pressuposto (descrito na item 3.4.1.Cenário De Logística Reversa), distribui a “geração de compressor descartado” para regiões brasileiras de acordo com a sua concentração industrial. Foi uma situação assumida e analisada que, no entanto, pode não corresponder fielmente à realidade, uma vez que, compressores de ar como o CSL 20BR são empregados, mesmo que em menor número, em setores de uso como o comercial e doméstico. A localização dos centros de recebimento em cada região, as distâncias e transportes envolvidos, também são situações assumidas.

O terceiro pressuposto foi aquele que contabilizou as frações materiais do compressor para posterior destinação por meio do somatório das frações materiais empregadas na composição do

equipamento. Este pressuposto apoiou-se na possibilidade de total separação dos materiais dos componentes compostos. Para o Cenário AS, é indiferente a existência desta possibilidade técnica ou não, uma vez que o compressor inteiro foi disposto em aterro. No entanto, para os Cenários RC e RM (aqueles que envolvem a reciclagem como destinação final dos materiais), esta condição pode influenciar e até impossibilitar a reciclagem do referido componente ou de seus materiais. Especificamente, para a reciclagem (tanto em RC como em RM), foi aplicando dois outros pressupostos. O primeiro foi aquele que se apoiou na concepção de produto evitado e o segundo em que os processos envolvidos na reciclagem foram totalmente eficientes. A concepção de produto evitado é modo encontrado para contabilizar o impacto positivo que um sistema de produto gera em análises que normalmente envolvem a recuperação de energia e/ou de matérias, sem precisar alocar os impactos ambientais destes co-produtos (recomendado por norma). Esta concepção é complementada pelo pressuposto de eficiência dos processos de reciclagem, na qual assumiu-se que 100% do material enviado para a reciclagem gera matéria-prima reciclada. Ao assumir ambos pressupostos, esta ACV passa a aproximar os Cenários RM e RC da situação mais favorável do ponto de vista ambiental possível.

Com relação ao acréscimo de vida útil do equipamento remanufaturado (Cenário RM), assumiu-se que consumiria metade das entradas e geraria exatamente a metade das saídas e produção volumétrica de ar comprimido, uma vez que foi acrescido de metade da vida útil proposta pelo setor de testes de bancada. No entanto, é possível que este equipamento não mantenha a eficiência de funcionamento e o mesmo plano de manutenção dividindo-o exatamente pela metade. Por se tratar de uma projeção, a empresa não possui os dados primários referentes a este teste de bancada específico.

A qualidade dos dados é uma questão recorrente em análises críticas de ACVs. Para esta análise os dados foram obtidos de duas fontes: primária (direta dos sistemas da empresa Schulz S/A) e secundária (estimadas a partir de recomendações da mesma empresa). As etapas de Aquisição de Matérias-Primas, Manufatura e Uso/Manutenção foram totalmente baseadas em dados primários, com poucas exceções da parte de transportes. A etapa da disposição final/pós-uso, a qual envolve os Cenários tema desta ACV, foram baseados em dados primários e secundários, e portanto, estão sujeitos a um grau um pouco maior de incertezas.

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação analisou três Cenários de pós-uso de um compressor de ar fabricado pela empresa Schulz S/A, evidenciando os desempenhos ambientais e as origens dos impactos para quatro categorias de impacto escolhidas: Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Demanda Acumulada Total de Energia e Ocupação de Terra. Finalizou realizando uma variação do posicionamento das fronteiras do sistema de produto (segundo etapas do ciclo de vida), de modo a compreender as influências das mesmas para os resultados.

Os três primeiros objetivos específicos foram alcançados, de forma que os cenários e o Inventário encontram-se descritos de acordo com as etapas do ciclo de vida do equipamento e possibilidades apontadas pela Schulz S/A; apoiados em dados primários coletados diretamente na indústria e complementação por dados secundários do *Ecoinvent*[®]. Os resultados de cada Cenário comparados à luz da metodologia de ACV para quantificação e identificação dos impactos ambientais foram demonstrados de acordo com o método *CML 2000* modificado; e, os gargalos dos Sistemas de acordo com seus cenários e influências estão também identificados e discutidos para cada categoria de impacto analisada.

O quarto objetivo específico foi alcançado por meio da análise de sensibilidade, demonstrando a evidente influência do posicionamento das fronteiras do sistema de produto com relação às etapas do ciclo de vida para os resultados gerados, inclusive, afetando na escolha do Cenário preferível. Portanto, a escolha da fronteira do sistema no pós-uso influenciará diretamente nos resultados finais. Assim, sempre que possível, quando o pós-uso de um equipamento for a remanufatura (modelo do cenário RM), deve-se envolver todas as etapas precedentes à mesma no escopo da ACV. Sendo o pós-uso um cenário como o RC, esta inclusão não é essencial embora seja necessária em ACVs comparativas, quando é preciso respeitar o mesmo escopo para ambos sistemas de produto (caso comparativo de RC e RM) ou quando os co-produtos de RC retornam ao próprio ciclo, deste modo influenciando suas etapas precedentes. Para o pós-uso envolvendo a reciclagem, a inclusão de produtos evitados ou alocação referentes aos co-produtos representa a sua influência sobre as demais etapas (caso comparativo entre RC e AS) não se fazendo necessária a inclusão das etapas precedentes. Quanto ao AS, seu pós-uso não influencia as etapas precedentes de seu ciclo de vida.

Com relação ao objetivo principal, a escolha do melhor Cenário em desempenho ambiental dentre aqueles propostos envolvendo aterramento, reciclagem e remanufatura para o pós-uso do compressor, ficou evidente que o destino preferível é a remanufatura, isto, quando contabilizado todas as etapas do ciclo de vida na avaliação de impacto. O Cenário de remanufatura (RM) apresentou os menores valores para todas as categorias de impacto analisadas como demonstrado pela Tabela 26 e Figura 26. O segundo melhor Cenário foi o da reciclagem (RC) e então, por último o aterramento (AS). Embora os cenários RC e RM acrescentem impactos negativos por conta de seus processos mais complexos no pós-uso, ambos estão ligados à impactos positivos associados ao reaproveitamento de materiais, o que resulta em um balanço, em melhores desempenhos ambientais que AS. RM é ainda preferível à RC por possuir menores necessidade de produção, uma vez que retorna o produto ao mercado para um segundo uso de 5 anos.

Embora a análise aprofundada tenha sido realizada sob a ótica de somente 4 categorias de impacto, a verificação geral, realizada no item 4.2.1. demonstra que RM possuiu menores impacto para as demais categorias do *CML2000*.

A abordagem proposta por esta dissertação apresenta certas proposições que podem e devem ser entendidas como oportunidades: o desenvolvimento de produtos prevendo o seu fim de vida de remanufatura ou reciclagem, de modo a facilitar a separação dos seus componentes, elaboração do “Design para a Reciclagem” e “Design para a Separação”, desenvolvimento de rede de logística reversa, iniciando no sistema de recolhimento do equipamento obsoleto; desenvolvimento de processos de reciclagem das frações compreendidas no produto e complementação desta própria ACV, buscando reforçar dados secundários e Cenários assumidos.

Amplificando a visão sobre a sustentabilidade do sistema de produto, como demonstrado por este estudo, a grande predominância da etapa de uso na geração de impactos em virtude do consumo elevado de energia elétrica durante o período estipulado, demonstra que este é o local onde os esforços devem ser concentrados para diminuir os impactos associados ao mesmo. O melhoramento, mesmo que pequeno, da eficiência do equipamento representará um ganho ambiental muito superior àquele resultante da aplicação do cenário RM como pós-uso. Entretanto, muitas vezes o desenvolvimento tecnológico e as concepções existentes não nos permitem realizar esta melhoria de forma fácil e direta, caso contrário a indústria já teria desenvolvido o produto

de forma mais eficiente, ganhando mais mercado. Neste sentido as potenciais reduções indicadas por este estudo e possivelmente nas demais etapas do ciclo de vida devem ser consideradas na busca de um produto menos impactante

6. RECOMENDAÇÕES

Muitas recomendações são advindas da análise crítica, de modo que os pontos abordados possam ser aperfeiçoados em uma ACV futura ou em uma continuação de outras avaliações de produtos/componentes da Schulz S/A.

Recomenda-se substituir dados de origem secundária por dados de origem primária e diminuir ao máximo o número de pressupostos utilizados para o fechamento dos ciclos de vida. Como basicamente apenas os Cenários de pós-uso foram baseados nesta origem, e neste caso a empresa não possui o domínio desta etapa, pode basear-se em setores semelhantes da indústria, como gerenciadores de REEE, ou ainda, criar uma central de gerenciamento piloto com medições de remanufatura e de reciclagem. Um dos pressupostos em especial necessita de maior detalhamento. Trata-se da questão da reciclagem das frações e do grau de eficiência dos seus processos, uma vez que muito provavelmente existirá associado à cada material reciclado uma porcentagem de perda pelos processos de reciclagem.

Com relação ao Cenário de logística reversa, também baseado em estimativas secundárias, os dados podem ser advindos ou espelhados em sistemas de logística reversa já existentes, como aqueles usados pelas empresas de baterias e pneus, ou ainda moldados a partir dos dados de vendas de compressores da empresa Schulz S/A para o Brasil e não com base na concentração industrial das regiões.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, R. A. **Avaliação de métodos de AICV**: um estudo de caso de quatro cenários de ração para frangos de corte. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

AMEZQUITA, T., HAMMOND, R., SALAZAR, M., BRAS, B. Characterizing the Remanufacturability of Engineering Systems. In: ADVANCES IN DESIGN AUTOMATION CONFERENCE – ASME, 1995, Boston. **Proceeding**... Boston, September, 1995, 17–20.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. 71, Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR ISO 14040**: Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura, 21. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações, 46. Rio de Janeiro, 2009b.

BAUMANN, H; TILLMAN, A. M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA**: an orientation in life cycle assessment methodology and application. Studentlitteratur, EUA. 1ª Edição. 2004. 543 p.

BENEDET JÚNIOR, G. **Avaliação de Incertezas em Inventários do Ciclo de Vida**. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BEZERRA, A. S. **Canal de Distribuição Reverso**: fatores de influência sobre as quantidades de baterias e aparelhos celulares reciclados na cidade de Campina Grande - PB. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba.

BISWAS, W; ROSANO, M. A (2011). Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Remanufactured Refrigeration and Air Conditioning Compressors. **International Journal of Sustainable Manufacturing**, 2, 1-15.

BJÖRKLUND, A; FINNVEDEN, G. (2005). Recycling Revisited: life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies. **Resources, Conservation and Recycling**. 44, 309–317.

BOSCH (Brasil). (2008). **Tecnologia de Ar Comprimido**. Disponível em: <<http://www.bosch.com.br>>. Acesso em: 12 jan. 2012. Campinas.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 2010a.

_____. **Resolução nº 03, de 22 de abril de 2010**. Dispõe sobre a Aprovação da Metodologia de Revisão do Plano de Ação Quadrienal 2008-2011, do Programa Brasileiro de Avaliação da Conformidade. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), 2010b.

BRIGDEN, K; LABUNSKA, I; SANTILLO, D.; ALLSOPP, M. (2005). Recycling of Electronic Wastes in China and India: workplace and environmental contamination. **Report**, Greenpeace International, 56.

BROWN, R. N. **Compressors: selection and sizing** (Third Edition). Gulf Professional Publishing, EUA. 2005. 640 p.

BURKETT, P. **Marx and Nature: a red and green perspective**. New York: St. Martin's Press. 199. 321 p.

CACUCI, D. G. **Sensitivity and Uncertainty Analysis: theory**. Volume 1. Ed. Chapman & Hall. Boca Raton. 2003. 285 p. Acesso em

02/05/2012. Disponível em http://inis.jinr.ru/sl/tot_ra/0/0/3/Cacuci-Sensitiv.pdf.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998. 104 p.

CIAMBRONE, D. F. **Environmental Life Cycle Analysis**. 1ª Edição. Boca Raton, EUA: Lewis Publishers, 1997. 139 p.

CULLEN, J. M; ALLWOOD, J. M. (2009). The Role of Washing Machines in Life Cycle Assessment Studies: the dangers of using LCA for prioritization. **Journal of Industrial Ecology**, 13, 27-37.

CURRAN, M. A. **Environmental Life-Cycle Assessment**. McGraw-Hill, Nova York, 1996.

DA COSTA, E. C. **Compressores**. São Paulo: Ed.Edgar Blucher LTDA., 1978. 172 p.

DAHER, C. E; SILVA, E. P. S; FONSECA, A. P. (2006). Logística Reversa: oportunidade para redução de custos através do gerenciamento da cadeia integrada de valor. **BBR Brazilian Business Review**. 3, 58-73.

DENISON, R. A. (1996). Environmental Life-Cycle Comparisons of Recycling, Landfilling, and Incineration: a review of recent studies. **Annual Review of Energy and Environment**. 21, 191-237.

DE HAES, H; FINNVEDEN, G; GOEDKOOP, M; HAUSCHILD, M; HERTWICH, E; HOFSTETTER, P; JOLLIET, O; KLÖPFFER, W; KREWITT, W; LINDEIJER, E; MÜLLER-WENK, R; OLSEN, S; PENNINGTON, D; POTTING, J; STEEN, B. (1997). **Life- Cycle Impact Assessment: striving towards best practice**. SETAC Press. Pensacola, Florida, EUA. 250.

DOWDELL, D. C; ADDA, S; NOEL, R; LAURENT, D; GLAZEBROOK, B; KIRKPATRICK, N; RICHARDSON, L; DOYLE, E; SMITH, D; THURLEY, A. (2000). An Integrated Life Cycle Assessment and Cost Analysis of the Implications of Implementing the

Proposed Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) **Directive Electronics and the Environment**, 1-10.

ELIJOŠIŪTĖ, E; VARŽINSKAS, V. (2010). Application of Life Cycle Measures to Increase Efficiency of Domestic Cooling Appliances. **Environmental Research, Engineering and Management**. 54, 54-61.

EMBLEMSVAG, J. **Life-Cycle Costing**: using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risks. John Wiley & Sons, New York. 2003. 320 p.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida**. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu. 2004. 80 p.

FRANCO, R. G. F; LANGE, L. C. (2011). Estimativa do Fluxo dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos no Município de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. 16, 73-82.

GREENOUGH, G. (2000). Selecting a Compressed Air System. **Metal Finishing Magazine**. 98. 398–400. 2000.

GUIDE JR, V. D. R; JAYARAMAN, V; SRIVASTAVA, R; BENTON, W. C. (2000). Supply-Chain Management for Recoverable Manufacturing Systems. **Interfaces**. 30, 125–142.

GUINEÉ, J.B; DE HAES, U; HUPPES, G. (1993). Quantitative Life Cycle Assessment of Products: goal, definition and inventory. **Journal of Cleaner Production**. 1, 1-13.

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. (2002). **Handbook on Life Cycle Assessment**. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692.

HAGELÜKEN, C; CORTI, C. W. (2009). Recycling of Gold from Electronics: cost-effective use through 'design for recycling'. **Gold Bulletin**, U.K. 43, 209-220.

HAUSCHILD, M; JESWIET, J; ALTING, L. (2005). From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 54, 1–21.

HOUGHTON, J. T. **Climate Change 1992**: the supplementary report to the IPCC scientific assessment. Press Syndicate of the University of Cambridge, New York, USA. 1992. 199 p. Acesso em 05/2012. Disponível:
books.google.com.br/books?id=6ERV_5M4wRsC&printsec=frontcover&hl=pt-R#v=onepage&q&f=false

HUISMAN, J; STEVELS, A. L. N; STOBBE, I. (2004). Eco-Efficiency Considerations on the End-ofLife of Consumer Eletronic Products. **IEEE Transactions on Eletronics Packaging Manufacturing**. 27, 9-25.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM. 2001. 204 p.

REVLOG - INTERNATIONAL WORKING GROUP ON REVERSE LOGISTICS (Holanda) (2012). **Revlog**. Acesso em: 05 fev. 2012. Disponível em:
<<http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/Introduction.htm>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010). **Censo Industrial Anual: Estados**. Acesso em abril de 2012. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>.

_____. (2012). **Mapas**. Acesso em março de 2012. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2001). **Climate Change 2001: the scientific basis**. IPCC **Third**

Assessment Report. Disponível em:
http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/.

_____. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. **IPCC Fourth Assessment Report (AR4).** Disponível em:
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
 Acessado em 02/05/2012. 52.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Lixo Municipal:** manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE. 1995. 278 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO/TR 14049:2000.** Environmental Management - Life Cycle Assessment - examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis, 2000.

_____. **ISO TS 14048:2002.** Environmental management -- Life Cycle Assessment - data documentation format, 2002.

_____. **ISO/TR 14047:2003.** Environmental management - Life Cycle Impact Assessment - examples of application of ISO 14042, 2003.

_____. **ISO 14040:2006.** Environmental management - Life Cycle Assessment - principles and framework, 2006a.

_____. **ISO 14044:2006.** Environmental Management - Life Cycle Assessment - requirements and guidelines, 2006b.

JOHNSON, R.W. (2004). The Effect of Blowing Agent Choice on Energy Use and Global Warming Impact of a Refrigerator. **International Journal of Refrigeration.** 27, 794–799.

JUNGBLUTH, N; FRISCHKNECHT, R. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.** Ecoinvent Report N° 3. Julho de 2010. Cap 2 – Cumulative Energy Demand. 33-40.

KERR, W; RYAN C. (2001). Eco-efficiency Gains from Remanufacturing: a case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. *Journal of Cleaner Production*. 9, 75–81.

KLOS, Z. (2000). First PhD Thesis on LCA in Poland: ecobalancing of machines and devices with the example of air compressors. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 5, 19-20.

KUMAR, S; PUTNAM, V. (2008). Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics*. 115, 305– 315.

LACERDA, L. (2009). . **Logística Reversa: Uma Visão sobre os Conceitos Básicos e as Práticas Operacionais**. Sargas: Competência em Logística, Rio de Janeiro, 2009. 1-6.

LAMBERT, A. J. D; STOOP, M. L. M. (2001). Processing of Discarded Household Refrigerators: lessons from the Dutch example. *Journal of Cleaner Production*. 9, 243-252.

LIMA, M. L. M; SILVA, J. B; LIMA, J. E. (2008). Manufatura Reversa e o Gerenciamento Adequado do Lixo Eletrônico. In: **IX SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – POR UMA GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL**, 9., 2008, Palmas. *Anais...*22 a 25 de outubro– Palmas, TO , 2008- Brasil.

LINDAHL, M; SUNDIN, E; ÖSTLIN, J. Environmental Issues within the Remanufacturing Industry. In: **CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING**, 13., 2006, Leuven. *Proceedings...* Leuven, Belgian, 2006. p. 447 - 452.

LINDAHL, M; SUNDIN, E; ÖSTLIN, J; BJÖRKMA, M. (2006). **Concepts and Definitions for Product Recovery: Analysis and Clarification of the Terminology Used in Academia and Industry**. Springer. *Innovation in Lyfe Cycle Engeneering as Sustainable Development*. Holanda. 123-138.

LEIDEN UNIVERSITEIT. (2011). **Handbook on LCA: Writing an Operational Guide to the ISO Standards for LCA and Related Sub-**

Projects. Institute of Environmental Science. 2011. Acesso em agosto de 2011. Disponível em <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutch-lca-guide>.

LEITE, P. R. (2002). Logística Reversa: Nova Área da Logística Empresarial. **Revista Tecnológica**. São Paulo, Editora Publicare. 1-6.

_____. **Logística Reversa: meio ambiente e competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2 Edição, 2006. p. 250.

LINDEIJER, E. (2000). Review of Land Use Impact Methodologies. **Journal of Cleaner Production**. 8, 273–281.

LÖFGREN, B; TILLMAN, A; RINDE, B. (2011). Manufacturing Actor's LCA. **Journal of Cleaner Production**. 19, 2025 – 2033.

MCLAMB, E. (2011). **The Ecological Impact of the Industrial Revolution**. Ecology Global Network. Setembro de 2011. Acesso em 03/05/2012. Disponível em <http://www.ecology.com/2011/09/18/ecological-impact-industrial-revolution/>.

METALPLAN. **Manual Do Ar Comprimido Empresa Metalplan**. Metalplan AirPower. Arquivo digital, 4º edição, 2010. Disponível em: www.metalplan.com.br. 59.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (1992). **Agenda 21 Global: conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento**. Capítulo 4: mudança dos padrões de consumo. Brasília, DF: MMA: PNUD, Disponível em <http://www.mma.gov.br>.

MONTIBELLER, G. F. **O Mito do Desenvolvimento Sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias**. Editora da UFSC. Florianópolis. 2001. p. 306..

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: INTERNATIONAL WORKSHOP

ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION: CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD, 3., 2011, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2011. p. 9.

NERI, P; BUTTOL, P; CREMONINI, M; RONCHI, A; TANI, G. (2000a). Life Cycle Assessment of an Axial Air Compressor Manufactured by the firm Fini Compressori. **Conferenza Environmentally Conscious Manufacturing**, 5-8 November, Boston, MA.

NERI, P; BERNARDI, G; BUTTOL, P; NALDI, G; SARIC, M; TANI, G. (2000b). A Comparison Between the Environmental Damages of two Axial Air Compressors Manufactured by the Firm Fini Compressori. **Conferenza Environmentally Conscious Manufacturing**, 5-8 November, Boston, MA.

ORSI, P. **Análise Ambiental de Cenários de Pós-Uso de Compressores de Ar**. 2011. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa, Florianópolis.

OTTO, R; RUMINY, A; MROTZEK, H. (2006). Assessment of the Environmental Impact of Household Appliances. **Appliance Magazine. Engineering - Energy Consumption**. Acesso 27/06/12. Disponível em: <http://www.appliancemagazine.com/ae/editorial.php?article=1393&zone=215&first=1><http://www.appliancemagazine.com/ae/editorial.php?article=1393&zone=215&first=1>.

PE AMERICAS (EUA). Aluminum Association. (2010). Life Cycle Impact Assessment Of Aluminum Beverage Cans: **Final Report**. Washington D.c, Acesso em: 21 maio 2010. Disponível em: http://www.aluminum.org/Content/ContentFolders/LCA/LCA_REPORT.pdf.

PRE CONSULTANTS. (2011). **LCA Software for Measuring Sustainability Impact**. PRE, Product Ecology Consultants, Holanda. Acesso em 10 de dezembro de 2011. Disponível em <http://www.pre.nl/>.

PORTUGAL, S. M; DANTÉS, G. B. (2010). Diagnóstico da Geração de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) **Revista Resíduos em Referência: Gestão de Resíduos e Sustentabilidade**, Centro Mineiro de Referência em Resíduos (CMRR). 16-21.

RAMÍREZ, P. **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RIBEIRO, C; FERREIRA, J. V; PARTIDÁRIO, P. (2007). Life Cycle Assessment of a Multi-Material Car Component. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 12, 336–345.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC). **Life Cycle Assessment: Principles And Practice**. Cincinnati: Office of Research And Development, 2006. p.80.

SAWYER, D. Population and Sustainable Consumption in Brazil. In: HOGAN, Daniel; BERQUÓ, Elza; COSTA, Heloisa (Eds.). **Rio + 10**. Campinas: CNPD, ABEP, NEPO, 2001. p. 224-54.

SCHULZ S/A. (2009). **Fundamentos da Energia Pneumática: princípios e aplicações**. Joinville: Schulz S/A. 54.

SCHULZ S/A. (2012). **Catálogo de Produtos: linha bravo**. Acesso 15/08/12. Disponível em <http://www.schulz.com.br/pt/site/compressores/produto/index/id/141#produto=141>.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"**. Edition 1. From the SETAC Workshop, Sesimbra, Portugal. Society Of Environmental Toxicology And Chemistry (SETAC), 1993. p. 73.

SIMBOLI, A; MORGANTE, A; TADDEO, R; ROSICA, P. (2011). Product End-of-Life in the Motorcycle Industry: defining scenarios. **Life Cycle Management Conference**, Berlin.

SMITH, V. M; KEOLEIAN, A. (2004). The Value of Remanufactured Engines: life-cycle environmental and economic perspectives. **Journal of Industrial Ecology**. 8, 2- 29.

SOARES, C; BLOCH, H. P. (1998). **Process Plant Machinery (Second Edition)**. Chapter 14: Reciprocating Compressors. 539 – 594.

SOARES, S. R.; FINOTTI, A; DA SILVA, V. P.; ALVARENGA, R. de F. (2012). Applications of Life Cycle Assessment and Cost Analysis in Health Care Waste Management. **Waste Management**. In Press, Corrected Proof. 1 - 9.

SOUSA, S. R. **Normalização de Critérios Ambientais Aplicados à Avaliação do Ciclo de Vida**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

STOSIC, N; SMITH, I. K.; KOVACEVIC, A. (2003). Optimization of Screw Compressors. **Applied Thermal Engineering**. 23, 1177–1195.

SUNDIN, E. **Product and Process Design for Successful Remanufacturing**. Linköping studies in Science and Technology. 2004. Dissertation N° 906. Department of Mechanical Engineering. Linköpings Universitet, 160, Linköping, Sweden.

TILLMAN, A. EKVALL, T; BAUMANN, H. RYDBERGT, T. (1994). Choice of System Boundaries in Life Cycle Assessment. **Journal of Cleaner Production**. 2, 1- 9.

UNITED NATION ENVIRONMENTAL PROGRAMME. (UNEP). **ABC of SCP: clarifying concepts on sustainable consumption and production**. Towards a 10 year framework of programmes on sustainable consumption and production, 2010. p. 33.

_____. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products: social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development**. 2009. p.104.

UNIÃO EUROPÉIA. (2003). Directive 2002/96/EC of The European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). **Official Journal of the European Union**.

USEPA (Org.). (2000). **WasteWise Update "Electronics Reuse and Recycling"**. Outubro de 2000 (No. 14). Acesso em abril de 2010. Disponível em: <http://www.epa.gov/smm/wastewise/wrr/updates.htm>.

_____. (2006). Scientific Applications International Corporation (SAIC). **Life Cycle Assessment: Principles And Practice**. Ohio. Acesso em: 08 jun. 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>.

_____. (2011). **Clean Energy - Greenhouse Gas Equivalencies Calculator**. Acesso em julho de 2012. Disponível em: <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/calculator.html#results>.

VAN OERS, L; DE KONING, A; GUINEÉ, J. B; HUPPES, G. **Abiotic Resource Depletion in LCA**: improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook. 75. Road and Hydraulic Engineering Institute., 2002.

VAN DER VOET, E. **Land Use in LCA**. CML-SSP Working Paper 02.002. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University. 22, Julho de 2001.

WANG, H; GUPTA, S. **Green Supply Chain Management**: product life cycle approach. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York. 2011. p.302.

WEIDEMA, B. (2001). Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment. **Journal of Industrial Ecology**. 4, 11 – 33.

WENZEL, H; HAUSCHILD, M; ALTING, L. (2001). **Environmental Assessment of Products**: Volume 1:Methodology, Tools and Case Studies in Product Development. 3ª Edição Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001 p. 539.

ZANGHELINI, G. M. (2010). Análise de Ciclo de Vida de um Reservatório Componente de um Compressor de Ar.2010. 121 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis.

APÊNDICE 1

CATEGORIAS DE IMPACTO

Existem diversas categorias de impacto ambiental que variam conforme modelo de AICV aplicado. Neste Apêndice foram abordadas resumidamente aquelas utilizadas para a ACV proposta por esta dissertação.

1. Depleção Abiótica

Depleção Abiótica ou Diminuição de Recursos Abióticos é uma categoria de impacto que mede a quantidade de recursos “não vivos” consumidos, como o minério de ferro e o óleo cru (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Para Guineé *et al.* (2002) existem três grandes grupos de recursos abióticos que podem ser distinguidos para esta categoria de impacto: depósitos, fundos e fluxos. Os depósitos, são recursos que não conseguem ser regenerados em gerações humanas, como por exemplo, o petróleo e a argila. Os fundos conseguem ser regenerados em determinado período dentro de gerações humanas, como água de aquíferos e o solo. Enquanto que fluxos são constantemente regenerados, a exemplo de ventos e energia solar.

O Fator de Esgotamento Abiótico (*Abiotic Depletion Factor* - ADF) é determinado para cada extração de minerais e combustíveis fósseis (cada elemento classificado para esta categoria de impacto possui seu ADP), medido em kg de antimônio (Sb) equivalente por kg do recurso extraído da natureza, com base na concentração de reservas do recurso (reservas naturais) e também com base na taxa de extração do mesmo (VAN OERS *et al.*, 2002). O Antimônio é o recurso escolhido como referência para esta categoria de impacto (GUINEÉ *et al.*, 2002).

A Depleção Abiótica de um sistema de produto é medida conforme equações abaixo, onde cada recurso consumido classificado para esta categoria de impacto possui um Potencial de Depleção Abiótica (ADP).

$$\text{Depleção Abiótica} = \sum_i ADP_i \times m_i$$

Onde:

$$\square\square\square\square = \square\square\square / (\square\square)^2 / \square\square\square\square / (\square\square\square)^2$$

Com:

$\square\square\square\square$ = Potencial de Depleção Abiótica do recurso (geralmente abiótica);

$\square\square$ = Quantidade do recurso extraído (em kg);

$\square\square\square$ = Taxa de extração do recurso (kg / ano);

$\square\square$ = Reserva final do recurso (kg);

$\square\square\square\square$ = Taxa de extração do recurso de referência, o antimônio (kg / ano);

$\square\square\square$ = Reserva final do recurso de referência, o antimônio (kg);

2. Mudança Climática

O IPCC (2007) em seu quarto relatório sobre mudanças climáticas, entende como mudança climática, uma alteração no estado do clima que pode ser identificado por variações na média e/ou através da variabilidade das suas propriedades, e que persiste durante um período prolongado, tipicamente décadas ou mais tempo. Considera-se qualquer mudança no clima ao longo do tempo, seja devido à variabilidade natural, seja como resultado da atividade humana.

A terra absorve naturalmente a radiação lançada pelo sol em sua superfície, e reflete, uma porcentagem na forma de longas ondas infravermelhas (HOUGHTON, 1992). Como explicam IPCC (2001) e Houghton (1992), parte desses raios refletidos são absorvidos por substâncias presentes nas camadas que perfazem a atmosfera, como o vapor d'água o dióxido de carbono e o metano. O calor é distribuído pelas circulações atmosféricas e oceânicas por todo o globo (IPCC, 2001). Este sistema equilibrado funciona de maneira a garantir a temperatura amena que temos na terra (média de 15°C).

No entanto, qualquer fator que altere a radiação recebida do Sol ou perdida para o espaço, ou que altere a redistribuição de energia dentro da atmosfera e entre a atmosfera, terra e mar, pode afetar o clima (IPCC, 2001). As causas para as mudanças climáticas, segundo o relatório do IPCC de 2007, são tanto naturais (por exemplo: erupções vulcânicas e variações no comportamento solar) quanto antropogênicas (incluindo os gases responsáveis pelo efeito estufa, GEE).

Segundo a USEPA (2011), as principais fontes de GEE são: as atividades antropogênicas, mais especificamente aquelas que envolvem a queima de combustíveis fósseis seja para uso industrial ou doméstico, e a queima de biomassa. Como listado pelo IPCC (2001), os GEE incluem aqueles listados no Protocolo de Kyoto: metano (CH₄), óxido

nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆); e aqueles listados sob o Protocolo de Montreal: clorofluorcarbonos (CFCs), os hidroclorofluorcarbonos (HCFC) e os halons. Baumann e Tillman (2004) citam ainda o dióxido de carbono (CO₂).

Dentro da metodologia de ACV, a Mudança Climática ou Aquecimento Global (termo utilizado pelo método *CML2000 Baseline*) é uma das categorias de impacto ambiental aplicadas na AICV. O principal propósito é calcular a contribuição relativa de diferentes gases com base em pesos iguais, que De Haes *et al.* (1997), simplificam descrevendo como uma correlação entre uma massa unitária de um gás e o quanto isto representa em massa unitário de outro gás e quanto este resultado contribui para o aquecimento global no horizonte de tempo estabelecido. O gás de referência para a caracterização é unidade de massa de CO₂ equivalente (DE HAES *et al.*, 1997). Os principais contribuintes para esta categoria de impacto, e portanto para o aquecimento global, são os Gases que contribuem para o Efeito Estufa (GEE) e algumas outras substâncias, como por exemplo os aerossóis oriundos de emissões de dióxido de enxofre (SO₂) (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Os GEE apresentam uma propriedade em comum, o que torna-os úteis para o modelo de caracterização utilizado em ACVs. Neste sentido Baumann e Tillman (2004) descrevem que a caracterização para esta categoria de impacto é baseada na capacidade de cada gás em absorver a radiação infravermelha, e como consequência, aquecer a atmosfera, ou, conforme o IPCC (2007), alterar o equilíbrio de energia no sistema terra-atmosfera. Esta capacidade é o forçamento radioativo, e consiste basicamente da radiação absorvida entre 10 e 15µm na janela espectral da atmosfera (DE HAES *et al.*, 1997). Os mesmos autores explicam que este aumento do forçamento radioativo é o efeito primário global segundo a comunidade de especialistas em atmosfera, havendo posteriormente sérios efeitos secundários e terciários, denotando a importância desta categoria de impacto.

O potencial de contribuição de uma substância para a mudança climática é expressa em Potencial de Aquecimento Global (PAG), ou em inglês *Global Warming Potential* (GWP) (BAUMANN; TILLMAN, 2004; CHEHEBE, 2002; DE HAES *et al.*, 1997; SETAC, 1993). O PAG de uma substância é definido por uma relação entre o aumento da absorção infravermelha desta substância e o aumento desta absorção por 1 kg de CO₂ (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Portanto, cada substância classificada para a categoria de impacto de aquecimento global, possui um PAG, que relativiza esta emissão a um valor equivalente em massa unitária de CO₂ emitido.

3. Demanda Energética Total Acumulada

Categoria de impacto incluída ao método CML 2000, contabiliza e soma a demanda total de energia necessária para o cumprimento do sistema de produto analisado (inclui as utilizações diretas, bem como o consumo indireto).

Utilizada nesta ACV, a versão 1,05 do método *Cumulative Energy Demand* (CED), quantifica em Mega Joules equivalentes (MJ eq.), através de algumas categorias (Tabela A) energéticas, a quantidade de energia retirada da natureza (JUNGBLUTH; FRISCHKNECHT, 2010).

Tabela A. Categorias de contabilização energética para o método CED.

Recursos	Categoria	Descrição
Não renováveis	Fóssil	Carvão, turfa, linhito, óleo cru, gás-natural
	Nuclear	Urânio
	Floresta Primária	Madeira e biomassa de florestas primárias
Renováveis	Biomassa	Madeira, alimentos e biomassa da agricultura (exemplo: palha)
	Vento	Energia do vento
	Solar	Energia Solar (aquecimento e energia)
	Geotérmica	Energia Geotérmica (100 a 300 m de profundidade)
	Água	Usinas hidrelétricas

Fonte: Jungbluth e Frischknecht (2010).

A caracterização dos valores para MJ equivalente é diferente para cada categoria listada na Tabela A. Tomando-se por exemplo, a energia consumida da categoria “Água”, onde contabiliza-se a energia de fonte hidráulica, o fator de caracterização utiliza a energia de rotação transmitida para a turbina, de modo que a energia de rotação é considerada igual a energia potencial da água no reservatório convertida de MJ para MJ eq. (JUNGBLUTH; FRISCHKNECHT, 2010). Em “Água” segundo o método CED 1.05, existem quatro compartimentos que podem ser classificados e caracterizados: Energia de fonte hidrelétrica, Energia do hidrogênio, Energia da energia potencial de reservatório e Energia de água em barragem. As três primeiras são caracterizadas de acordo com a relação de que 1 MJ transmitida à turbina é igual a 1 MJ equivalente, enquanto que a energia da água de

barragem possui uma caracterização inferior relativo a 0,01 MJ por kg de água armazenada.

4. Uso de Terra

Impactos de uso de terra em ACVs estão relacionados com a área de terra utilizada, geralmente em combinação com o tempo necessário para produzir uma determinada saída (produto) (LINDEIJER, 2000).

Esta categoria compila impactos de área ocupada, pelo uso direto, bem como da sua transformação. No caso da transformação, são também compreendidas as alterações da biodiversidade e as alterações das funções de suporte (como produções biológicas, por exemplo: consumo de CO₂ por áreas plantadas), explicam Baumann e Tillman (2004) e Guineé *et al.* (2002).

Van der Voet (2001) enumera três situações possíveis para a ocupação de terras. A primeira é o uso para propósitos idênticos aqueles já aplicados nesta área, a segunda é o uso para propósitos diferentes daqueles já aplicados no espaço e a última é o uso de áreas até então nativas. O autor afirma que somente a segunda e a última situação requerem transformações no uso de terra, mas que no entanto, todas as três devem ser consideradas espacialmente e temporalmente. Baumann e Tillman, (2004) entendem que existindo competição entre os diferentes usos de terra para uma determinada área, é necessário a utilização de uma unidade temporal, relativa ao período em que a terra é ocupada. Assim, a categoria é caracterizada em m² por ano.

O método CML 2000 originalmente não possui uma categoria de impacto que aborda o uso de terras, então adaptou-se do método CML 2001 a categoria de *Land Competition*, ou, como denominado nesta dissertação, Uso de Terra. O método de caracterização utilizado pelo CML 2001 foi denominado por Guineé *et al.* (2001) de “agregação não ponderada” e atribui o mesmo peso a todas às possíveis entradas classificadas para esta categoria de impacto. Considera uma matriz de terras ocupadas, urbanas e nativas, incluindo área de aterro e lixões, áreas industriais, área de extração de minérios, áreas aráveis e de florestas, áreas de ocupação de rodovias, plantio de culturas, etc.

APÊNDICE 02

FLUXOGRAMA DE PROCESSOS E ENTRADA DE COMPONENTES

